ЭРИК РОДЖЕРС

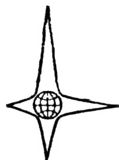
ФИЗИКА

для любознательных

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
И МАГНЕТИЗМ

АТОМЫ
И ЯДРА





ИЗДАТЕЛЬСТВО
«МИР»

PHYSICS FOR THE INQUIRING MIND

THE METHODS, NATURE AND PHYLOSOPHY OF PHYSICAL SCIENCE

by

ERIC M. ROGERS

1966

PRINCETON, NEW JERSEY

PRINCETON UNIVERSITY PRESS

Эрик Роджерс

ФИЗИКА ДЛЯ ЛЮБОЗНАТЕЛЬНЫХ

ТОМ 3

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ. АТОМЫ И ЯДРА

Перевод с восьмого американского издания
Под редакцией
проф. В. Ф. КИСЕЛЕВА

Общая редакция
академика
Л. А. АРЦИМОВИЧА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
МОСКВА 1971

УДК 530.1

Перевод с английского
И. Б. ВИХАНСКОГО, Г И. МЕРЗОНА,
Г. Я. КОРЕНМАНА

Редакция литературы по физике

Инд. 2-3-1
71

Эрик Роджерс

ФИЗИКА ДЛЯ ЛЮБОЗНАТЕЛЬНЫХ

Том 3

Редактор *Т. К. Бреус* Художник *Г. А. Щетинин*
Художественный редактор *П. Ф. Некундэ* Технический редактор *М. П. Грибова*

Сдано в набор 4/XI 1970 г. Подписано к печати 19/II 1971 г.
Бумага № 2 $60\times84^1/_{16}$=20,75 бум. л. 38,72 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 38,57
Изд. № 2/5221. Цена 1 р. 50 к. Заказ № 1558.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ордена Трудового Красного Знамени Первая Образцовая типография
имени А А. Жданова Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров
СССР, Москва, М-54, Валовая, 28

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Как хозяин в доме, вы должны знать об электричестве больше, нежели просто уметь сменить пробки. Необходимо понимать зависимость между током, напряжением и мощностью, преимущества и недостатки переменного тока. Первая глава этого тома рассказывает об электричестве в домашнем хозяйстве.

Если вы интересуетесь атомной физикой, то должны иметь представление об электричестве и магнетизме, чтобы понять, как получают сведения об атомах. Последующие главы дадут вам такое представление.

Если вы склонны к обобщениям и вас интересует построение *теории*, то обратитесь к главе о магнетизме, где вы найдете хороший пример развития теоретических идей.

Стремясь усвоить знания, которые дает вам чтение этого тома, не упускайте из виду предостережений о пределах этих знаний. Настоящий ученый полностью сознает существование таких пределов. Он должен знать, «чего он не знает», ибо значительная часть труда ученого лежит на рубеже между известным и неизвестным.

«Знание гордится тем, что так много узнало;
Мудрость стыдится того, что не узнала больше».

Уильям Купер (~1760 г.)

ГЛАВА 32 • ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ. ЛАБОРАТОРНЫЕ ОПЫТЫ

...чтобы узнать вещь, нужно ее сделать; ибо хотя вы думаете, что знаете ее, в этом не может быть уверенности, пока вы не попытаетесь ее сделать.

Софокл

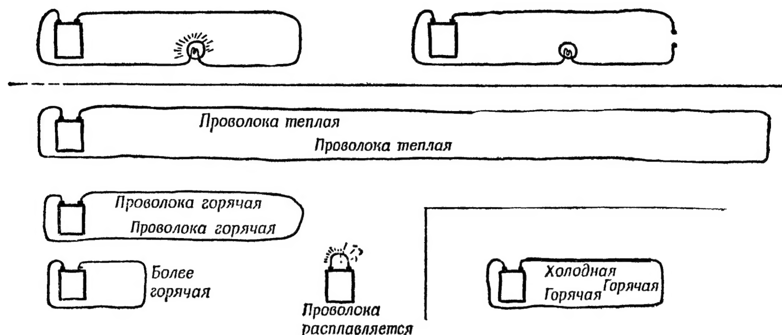
Эта глава посвящена лабораторным опытам. *Прочтите их описание, не рассчитывая ни на какие лекции, и проделайте предложенные опыты.* Если у вас ничего не получится, то посмотрите демонстрации этих опытов. Тогда, прочтя эту главу и опираясь на свои общие познания, вы сможете хорошо понять, что такое электрические цепи.

Первые сведения об электричестве, появившиеся много столетий тому назад, относились к электрическим «зарядам», полученным посредством трения. Электрические цепи, подводящие ток к осветительным лампочкам и электромоторам, появились лишь после изобретения батарей, которое датируется примерно 1800 годом. Потом развитие учения об электричестве пошло так быстро, что менее чем за столетие оно стало не просто частью физики, но легло в основу новой электрической цивилизации.

В этом курсе мы не будем следовать истории, а займемся изучением электричества посредством лабораторных опытов, которые проводятся с помощью современной аппаратуры. При этом будут использоваться общие сведения об электрических цепях, которые вы почерпнули, живя в мире автомобилей и электрического освещения.

Вот некоторые *опытные факты* об «электрических цепях», используемых для освещения домов, в системе электроосвещения автомобиля, в электрических звонках и т. д. Прежде всего необходим какой-то источник — батарея, генератор или провода, идущие от электростанции. Чтобы заставить лампочку гореть (или мотор вращаться), нужно протянуть от источника

к лампочке и от лампочки обратно к источнику металлическую проволоку. Внутри лампочки находится тонкая металлическая нить накала; таким образом, на всем протяжении от источника к лампочке и обратно идет металлическая проволока того или иного рода. Если эту проволоку разорвать, лампочка погаснет. Выключатель — это просто приспособление, позволяющее производить такой разрыв. То же самое происходит, когда расплавляется проволочка в пробке. Эта непрерывная металлическая трасса для тока называется электрической цепью. Если исключить из цепи



Фиг. 1. Электрические цепи.

лампочку и составить цепь из длинного куска тонкой проволоки, то вся проволока нагреется; на всем ее протяжении происходит нечто такое, что приводит к нагреванию проволоки [1]. Если часть проволоки тонкая, а часть толстая, толстая проволока нагревается значительно меньше тонкой; лампочка в цепи, о которой шла речь вначале, представляет собой предельный случай цепи, состоящей из проволоки разной толщины. Если сократить длину проволоки, то она нагреется до более высокой температуры. Когда цепь состоит из очень короткого куска проволоки, проволока может нагреться до температуры, при которой она расплавится или вызовет воспламенение окружающих предметов. В этом случае говорят о «коротком замыкании», имея в виду любую электрическую цепь, настолько короткую, т. е. обладаю-

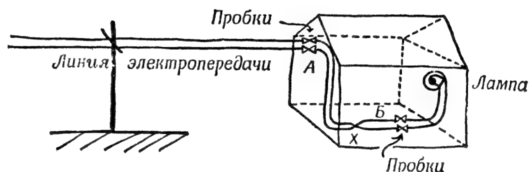
[1] Мы тем самым распространили нагрев нити накала лампочки на всю цепь.

щую таким малым сопротивлением, что возникает опасность повреждения цепи.

Чтобы избежать опасностей, связанных с коротким замыканием, проволоку изолируют, защищают неметаллическим покрытием, например резиной, вощеной бумагой, тканью [1].

Задача 1. Короткое замыкание

Предположим, что провода, идущие от какого-либо источника к осветительной лампочке и обратно, как показано на фиг. 2, случайно касаются друг друга, и в точке X имеется хороший контакт между металлическими частями обоих проводов.



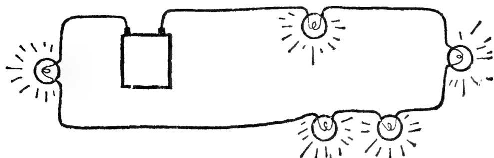
Фиг. 2. К задаче 1.

а) Какие участки цепи должны нагреться больше всего?
б) Показанные на фигуре предохранители содержат проволочки из легкоплавкого металла. Если предохранители расплавятся, то какие: А или Б?

Рассматривая вновь цепь с лампочкой, мы обнаружим, что, если поместить лампочку в какую-нибудь другую точку цепи, она по-прежнему будет гореть. Если включить в цепь «последовательно» несколько лампочек, то все они будут гореть одинаково, но значительно менее ярко, чем одна лампочка. По-видимому, на всем протяжении цепи в ней что-то происходит: в цепи поддерживается некое состояние готовности заставить лампочку гореть. Специальные опыты с нитями накала электрических лампочек показывают, что лампочка светит просто в результате подвода тепла к нити: если бы мы смогли нагреть нить до такой же температуры при

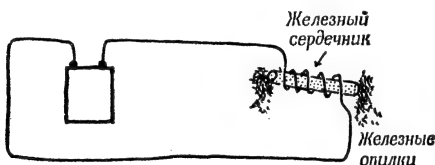
[1] Теперь изоляционное покрытие наносят на проволоку в виде обмотки, оплетки, слоя лака или пластика с помощью машин-автоматов. В те времена, когда электрические схемы только появились, массового производства изолированной проволоки не было. Голую проволоку, которую применяли на фермах и предприятиях, приходилось изолировать вручную с помощью нитки или полосок ткани. Профессору Джозефу Генри, проводившему столетие назад в Принстоне опыты над устройствами — предшественниками радио, потребовалось изготовить обмотки для большого электромагнита. Чтобы изолировать проволоку, он разорвал на полоски шелковую юбку своей жены и обмотал ими проволоку.

помощи бунзеновской горелки, она светилась бы так же ярко. Таким образом, рассматриваемое нами специфическое «электрическое свойство» цепи заключается, по-видимому, в том, что в любом месте цепи может выделяться тепло [1].



Фиг. 3. Все лампочки светят одинаково ярко.

Посмотрим, обладает ли цепь другими «электрическими свойствами». Не разрывая проволоки, сверните ее в спираль, как это сделали Эрстед и Ампер столетие тому назад. Вы увидите, что проволока, свернутая в спираль, намагничивает железный стержень: будучи введен внутрь спирали, стержень притягивает железные опилки. Если взять две такие спирали, каждая из которых включена в свою электрическую цепь, то можно намагнитить два стержня и наблюдать сильное взаимное притяжение или отталкивание между ними. Сами по себе спирали, без железных сердечников, лишь слабо притягивают или отталкивают друг друга.



Фиг. 4. Электромагнит.

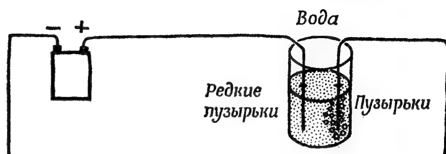
Взаимное притяжение и отталкивание электромагнитов лежит в основе работы электрических двигателей, звонков, телефонов и некоторых типов измерителей тока (амперметров). Отметим опять-таки, что спираль может находиться в цепи в любом месте, лишь бы цепь оставалась замкнутой. Таким образом, цепь обладает еще одним «электрическим свойством» [2] — оно проявляется в магнитном действии цепи.

---

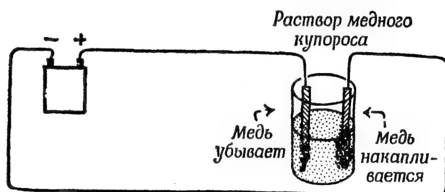
[1] Заметьте, что мы уже назвали это электрическим свойством, а если появилась необходимость присвоить ему специальное наименование, значит, речь идет о свойстве, достаточно важном.

[2] Мы присваиваем этому свойству тот же самый эпитет «электрический», поскольку оно всегда проявляется наряду с тепловым эффектом. Мы приходим к выводу, что оба свойства представляют собой различные аспекты одного и того же явления — смелое предположение, оказавшееся удачным.

Обладает ли электрическая цепь еще каким-нибудь свойством? Оказывается, да, но электрический эффект третьего вида, связанный с этим свойством, проявляется не столь заметно. Поэтому удивительно, что он был открыт одновременно с другими эффектами 150 лет тому назад, в бурный период великих открытий и изобретений в области электричества. Перережьте в каком-нибудь месте проволоку, из которой образована электрическая цепь, и погрузите оба конца проволоки в стакан с сырой водой [1]: вы



Фиг. 5. Химическое действие электрического тока.
а — вода; *б* — раствор медного купороса.



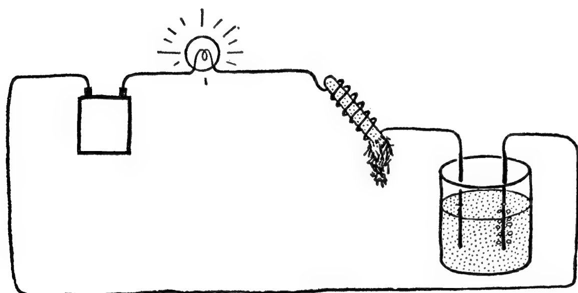
заметите появление маленьких пузырьков газа. Добавьте к воде поваренной соли или уксуса, и вы сможете наблюдать значительно более ощутимый эффект: от одной или от обеих погруженных в раствор проволок поднимаются пузырьки газа, в растворе происходят химические превращения. Растворите в воде несколько кристаллов медного купороса и погрузите в голубой раствор концы медной проволоки: одна проволока будет становиться все тоньше и тоньше, а другая — покрываться все более толстым слоем меди. Происходит так называемое «электролитическое осаждение» меди. В этом случае мы говорим о «химическом эффекте».

Электрический ток

Все три эффекта могут наблюдаться в одной и той же цепи одновременно. Они имеют место даже внутри батареи или генера-

[1] В дистиллированной воде эффект получается очень слабый, поскольку дистиллированная вода — почти изолятор.

тора, указывая на нечто, происходящее на всем протяжении цепи, на всех ее участках (фиг. 6). Эта особенность электрической цепи навела первых экспериментаторов на мысль о сходстве происходящего в цепи процесса с течением жидкости по замкнутому трубопроводу. Они представляли себе, что по цепи течет некая таинственная субстанция, электричество. Название, которое они присвоили этому течению, «электрический ток», оказалось исключительно удачным, и мы сохранили его. Если бы на самом деле в цепи ничего не протекало, то слово «ток», возможно, мешало бы ясному пониманию явлений. Теперь мы знаем, что ток действитель-



Фиг. 6. В цепи можно наблюдать все три вида действий электрического тока.

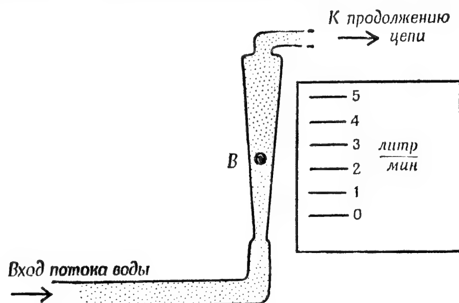
но существует,— обычно это ток отрицательных электронов,— поэтому мы сохранили этот заимствованный из гидравлики термин для нашего лексикона. До сих пор мы не представили никаких доказательств реального существования такого тока и тем не менее стали пользоваться в нашем курсе этим термином, стремясь сразу же познакомить вас с представлением об электрическом токе.

В элементарных курсах электричества мы и сегодня уподобляем электрические цепи гидравлическим замкнутым системам из водопроводных труб, заполненных на всем протяжении водой, с насосами, кранами, расходомерами [1], манометрами..., которые

[1] На фиг. 7 показан расходомер простой конструкции, предназначенный для измерения расхода жидкости, скажем, в *л/мин*. Вода течет вверх по вертикальной суживающейся книзу трубе мимо стеклянного или металлического шарика *B*, диаметр которого немного меньше диаметра самой узкой части трубы. Поток воды уносит шарик вверх по трубе до места, в котором он остается неподвижным. Достигнутая шариком высота характеризует величину расхода. Чем больше скорость течения воды, тем выше должен подняться шарик, прежде чем зазор между ним и стенками трубы не окажется достаточно большим, чтобы вода могла течь мимо шарика, не проталкивая его еще выше. Модель такого расходомера интересно посмотреть, это даст

мы ставим в соответствие генераторам, выключателям, амперметрам, вольтметрам... Как и во многих других случаях применения аналогий в обучении, эта аналогия позволяет начинающим легче понять явления, о которых идет речь. Поскольку трубы полны воды, очевидно, что расход воды (скажем, 10 *л/мин*) будет одинаков всюду в системе: расходомеры в A, $Б$, B и т. д. дадут одно и то же показание 10 *л/мин* [1]. Если труба разделена на несколько «параллельных» ветвей, то очевидно, что сумма расходов в отдельных ветвях равна расходу в магистрали (на фиг. 9 6 *л/мин* через ветвь X плюс 4 *л/мин* через ветвь Y дают в сумме расход 10 *л/мин* в магистрали). Для сложной системы, вроде той, что показана на фиг. 10, справедливо очевидное правило: для любой узловой точки, например точки A, суммарный расход во всех трубах, которые сходятся в этой точке, равен нулю (при этом расход жидкости, текущей в направлении точки A, учитывается со знаком плюс, а от точки A — со знаком минус). Однако утверждение, что электрическая цепь «в точности подобна» замкнутому контуру из труб, по которому течет вода, не есть доказательство верности такой аналогии. Понятие «электрический ток» носит ретроспективный характер, оно было введено после того, как мы опытным

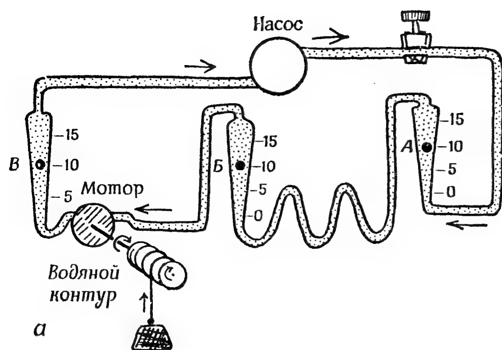
возможность лучше представить себе, что такое амперметр. Такие расходомеры есть в продаже под названием ротаметров. Вместо шарика в них используется поплавок с наклонными пазами, который вращается вокруг своей оси, достигнув равновесного положения. В то время, как поплавок ротамет-

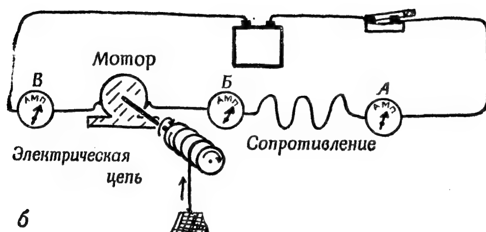


Фиг. 7. Ротаметр — измеритель расхода для жидкостей.

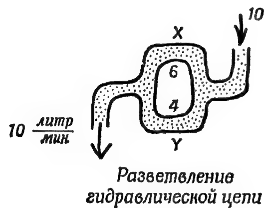
ра свободно вращается в трубе, стеклянный шарик держится вблизи стенки трубы. (*Задача*: почему шарик ведет себя таким образом? Решение связано с материалом, изложенным в нашем курсе ранее.)

[1] В противном случае вода должна где-то накапливаться или где-то должна быть утечка воды. Если рассматривается течение несжимаемой жидкости в замкнутом трубопроводе, то расход в нем должен быть всюду одинаков.



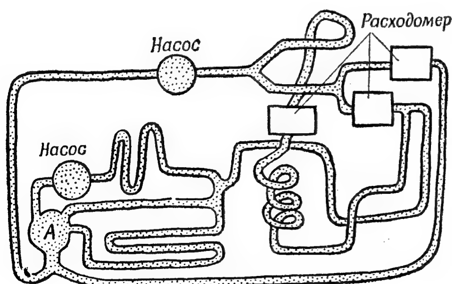


Фиг. 8. Аналогичные цепи.





Фиг. 9. Разветвленные цепи.



Фиг. 10. Раздолье для водопроводчика.

Одиночный элемент

6-вольтовая батарея

100 в

100-вольтовая батарея

Пост. ток

Пер. ток

Розетка

Мотор или генератор

или

или

Плавкий предохранитель

Выключатель

Двухполюсный выключатель

или

Л

Лампочка

Конденсатор

A

Амперметр

V

Вольтметр

mA

Миллиамперметр

G

или

Гальванометр

(амперметр для приближенных измерений очень малых токов)

Сопротивление

(Спираль из проволоки обозначается тоже так)

Переменное сопротивление (реостат)

Последовательное соединение

Параллельное соединение

Электромагнит (или индуктивность)

Электромагнит (индуктивность с железным сердечником)

Трансформатор

Электролитическая ванна

Нагреватель в воде

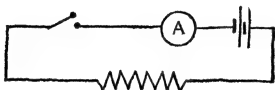
Фиг. 11. Стандартные обозначения элементов электрических цепей.

путем установили свойства электрической цепи, напоминающие свойства водяного контура. Вообще говоря, обращение к аналогиям — хороший педагогический прием, но злоупотреблять им, используя аналогию как доказательство, ученый не имеет права [1].

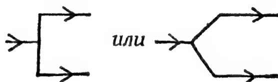
Получив представление об электрической цепи с помощью проведенной выше аналогии, вы должны по возможности самостоятельно, за своим лабораторным столом проделать необходимые работы, не ограничиваясь наблюдением демонстрационных опытов. Если вы работаете в лаборатории с партнерами, то каждый из вас должен сам начертить схему, прежде чем присоединять какие-нибудь приборы. Производить соединения по готовой схеме, водя по ней пальцем,— это работа для детей дошкольного возраста. С другой стороны, отбросить схему в сторону и составлять цепь «из головы» — не значит поступать подобно зрелому ученому: вы легкомысленно полагались бы на то, что вам повезет, а ученому чужд такой подход.

Как чертить схемы

Физики и инженеры-электрики давно систематизировали изображение электрических схем. На фиг. 11 приведена сводка стандартных правил и символов, которыми мы будем пользоваться.



Фиг. 12.



Фиг. 13.

Все соединительные провода, толстые или тонкие, изображаются тонкими прямыми линиями, по возможности вертикальными и горизонтальными. Так, простые цепи чертятся в виде прямоугольников независимо от того, как они выглядят в реальном опыте.

---

[1] С давних пор предъявляют претензии преподавателям за то, что они с легкостью прибегают к иллюстрациям. Действительно, средневековые ученые совершали большую ошибку, делая вывод о том, «что должно быть», на основании утверждений кого-нибудь из авторитетов. А современные популяризаторы науки делают другую ошибку, втискивая с трудом добытые знания в сомнительные аналогии, из которых затем будто бы вытекают научные выводы. Попытки облегчить понимание физики с помощью аналогии могут увести читателя в сторону от истины, если его вовремя не предостеречь.

Разветвленную цепь тоже изображают с помощью горизонтальных и вертикальных линий, но можно пользоваться и наклонными [1].

Плюс и минус

Некоторым электрическим явлениям присущи признаки определенного *направления* тока. Два полюса батареи неодинаковы. Поэтому, чтобы различать полюсы, их помечают красным и черным цветом или знаками «+» и «—» и называют положительным и отрицательным [2] зажимами. При изображении на схемах батарей, составленных из последовательно соединенных элементов, пользуются следующими общепринятыми обозначениями (знак «+» и «—» писать при этом не обязательно):

отрицательный полюс изображают короткой вертикальной чертой (действительно напоминающей знак «—»),

положительный полюс изображается длинным отрезком тонкой вертикальной линии (длина его достаточна, чтобы начертить знак «+»!).



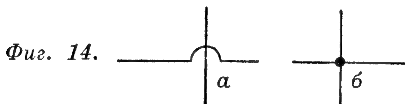


Фиг. 15

При изображении на схемах батареи элементов, соединенных последовательно, т. е. «+» одного с «—» следующего, соединения между элементами опускают.

---

[1] Пересечение двух проводов, которые *не имеют между собой контакта*, для ясности показывают на схеме так, как на фиг. 14, *а*. Соединение проводов изображают точкой (фиг. 14, *б*). Не чертите пересечений проводов без пере-



Фиг. 14.

ходов и без точек — это новейшее условное обозначение может вас запутать, хотя от некоторых радиоинженеров можно услышать, что «это очевидно для каждого, кто понимает, что́ имеется в виду».

[2] Названия «положительный» и «отрицательный» ввел Бенджамин Франклин. Мы могли бы вместо этого употребить названия *А* и *Б*, но арифметические понятия «плюс» и «минус» удачно напоминают, что речь идет здесь о «противоположных» электрических зарядах, которые могут нейтрализовать друг друга точно так же, как положительные и отрицательные числа, +6 и —6, при сложении дают в сумме нуль.

(Прежде чем приступить к выполнению опыта, начертите сами схему цепи.)

Опыт 1. *Простая цепь.* а) С помощью амперметра [1] «измерьте ток», протекающий через горящую маленькую лампочку. Для этого соедините проводами последовательно батарею, выключатель и амперметр, чтобы получилась замкнутая цепь.

б) Включите в цепь «переменное сопротивление» или «реостат» [2] и воспользуйтесь им для изменения тока через лампочку.

---

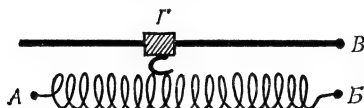
[1] *Применение амперметров в лаборатории.* В самых распространенных типах амперметров, если поменять местами провода, идущие от батареи к зажимам амперметра, стрелка прибора отклоняется в обратную сторону. Это вполне подходящее основание для утверждения, что два полюса батареи неодинаковы. Чтобы избежать неправильного включения и повреждения прибора, изготовители амперметров помечают один зажим знаком плюс. Амперметр не имеет реальных полюсов «+» и «—», как батарея, поэтому пометка зажимов амперметра соответствует не его физическим особенностям, а лишь некоему произвольному условию, заключающемуся в следующем: зажим, к которому подводится провод от «плюса» источника питания, помечается знаком «+».



Фиг. 16.

Хороший амперметр очень легко испортить. Стрелка прибора прикреплена к рамке, которая вращается в подшипниках из драгоценного камня с очень малым трением, как баланс в наручных часах. Точки опоры на концах оси рамки не представляют собой точек в геометрическом смысле слова — слишком острый конец оси согнулся бы и затупился, но площадь торцов оси, опирающихся на камни, чрезвычайно мала. Вес подвижной системы, действующий на эту малую площадь опоры, создает колоссальное *давление*, которое в хороших измерительных приборах может быть порядка тонны на 1 $см^2$ и может затупить острие опоры. Если резко опустить прибор и поставить его на стол, то отрицательное ускорение, во много раз превысившее g, приводит к многократному возрастанию давления на опору. Острие может затупиться, и произойдет заедание стрелки прибора. Ремонт таких амперметров стоит дорого, и обращаться с ними нужно очень осторожно.

[2] Слово «реостат» означает «успокоитель» или «регулятор потока». Обычные лабораторные реостаты представляют собой однослойную катушку из проволоки, сделанной из специального сплава, которая присоединена



Фиг. 17.

концами к зажимам *А* и *Б*; по катушке перемещается ползунок *Г*, имеющий электрический контакт с проволокой и присоединенный к зажиму *В*. Чтобы получить переменное сопротивление, нужно использовать два из трех зажимов.

в) Проверка плавких предохранителей. Имеется плавкий предохранитель с надписью «плавкая вставка 1 *а*»; проверьте утверждение фирмы-изготовителя, содержащееся в фирменной надписи.

Опыт 2. *Сопротивление.* Насколько отличаются между собой значения тока, выходящего из сопротивления и входящего в него, т. е. насколько сопротивление уменьшает ток в различных частях цепи? В продолжение всего этого опыта значение переменного сопротивления должно оставаться постоянным.

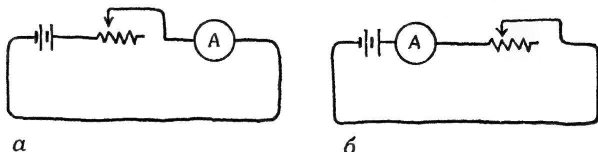
Включите амперметр (*а*) непосредственно до и (*б*) после переменного сопротивления и сравните его показания в обоих случаях.

Опыт 3. *Ток через осветительные лампочки.* Подключите к каждой из приведенных ниже цепей автомобильный аккумулятор без реостата, чтобы зажглись лампочки. Измерьте ток и обратите внимание на яркость свечения лампочек в каждом случае:

а) одна автомобильная лампочка с выключателем;

б) две лампочки, соединенные последовательно, с выключателем;

в) две лампочки, соединенные параллельно, с отдельным выключателем для каждой.

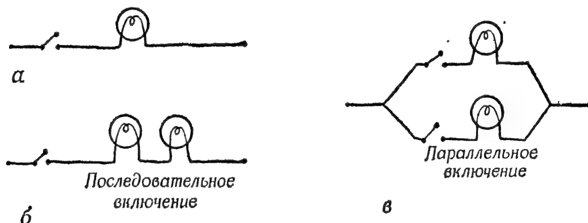


Фиг. 18. Опыт 2.

Опыт 4. *Качественные опыты, демонстрирующие действия электрического тока.* Проделайте некоторые из предлагаемых опытов, используя простую цепь, вроде цепи для проверки плавких предохранителей в опыте 1, в). Если у вас нет амперметра, то можно составить цепь и без него, но только нужно соблюдать осторожность, чтобы не пережечь реостат, поэтому необходимо включить в цепь подходящий предохранитель.

1. *Тепловое действие тока.* С ним вы уже встречались на примере ламп накаливания и плавких предохранителей.

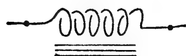
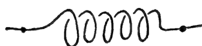
2. *Магнитное действие тока.* Вставьте в цепь длинный кусок гибкой изолированной проволоки и пропустите через нее большой ток. Обмотайте проволоку вокруг железного стержня (например, большого гвоздя), чтобы получилась катушка с железным сердечником. Поднесите к катушке, когда по ней



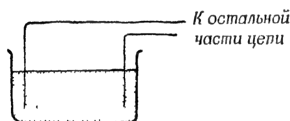
Фиг. 19. Опыт 3.

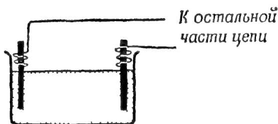
проходит большой ток, немного мелких железных опилок. Попробуйте включать и выключать ток. (Если пропускать через катушку очень большой ток, то эффект будет более ярко выражен, но тогда вам придется включать ток всего на несколько секунд, чтобы избежать повреждения проводов.) Проделайте опыт с катушкой без железного сердечника и с проволокой, не свернутой в спираль. При изображении схем этих опытов используйте стандартные обозначения электромагнитов с сердечником и без него.

3. *Химическое действие тока* Разорвите цепь и включите в рассечку две проволоки, погруженные в сосуд с водой. Проделайте опыт с дистиллированной водой, с водой, к которой добавлена серная кислота, с раствором медного купороса и понаблюдайте за действием тока во всех этих случаях. Медная проволока может участвовать во вторичных химических превращениях, поэтому опыты следует повторить, погружая в раствор стержни из химически инертного графита, например грифели от карандаша.

Фиг. 20. Опыт 4 (2).

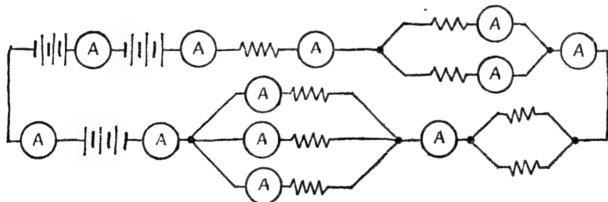




Фиг. 21. Опыт 4 (3).

ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ОПЫТ. АМПЕРМЕТРЫ И РАЗВЕТВЛЕННЫЕ ЦЕПИ

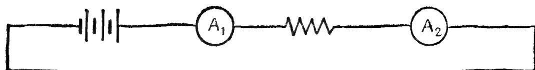
Составьте какую-нибудь сложную цепь, вроде показанной на фиг. 22. Снимите показания амперметров и сделайте выводы, которые вы считаете обоснованными.



Фиг. 22.

Задача 2. Амперметры

В схеме, изображенной на фиг. 23, один амперметр показывает значительно больший ток, чем другой.



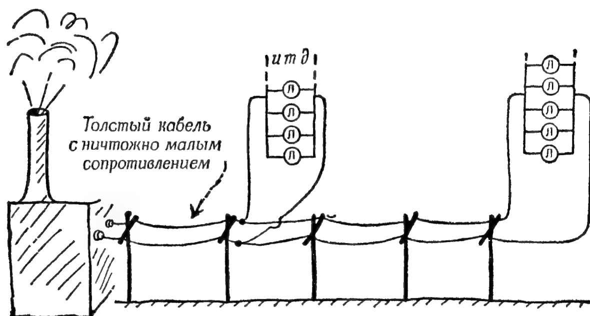
Фиг. 23. К задаче 2.

а) Предложите объяснение этому обстоятельству.
б) Как вы стали бы проверять свое объяснение экспериментально?

Задача 3. Электроснабжение

На фиг. 24 показана электростанция, снабжающая энергией две деревни. Ток поступает по толстым медным проводам, сопротивление которых пренебрежимо мало. *Из очевидных соображений удобства включения и выключения ламп, а также из важных соображений, связанных с током и сопротивлением, лампы накаливания включены в каждой деревне «в параллель». Как изменится показание амперметра, включенного в цепь на станции.*

а) если 100 ламп, отстоящих на 1 км, будут выключены и в тот же момент включат 100 ламп, отстоящих от станции на 2 км?
б) если общее количество зажженных ламп удвоить?



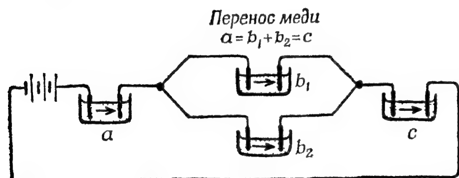
Фиг. 24. К задаче 3.

Обратите внимание на то, что вы пользовались амперметром, не имея никаких сведений о его устройстве и принципе действия. Но это ничуть не хуже, чем пользоваться секундомером, не открывая его. Узнав, как амперметры ведут себя в реальных опытах, вы можете в зависимости от их поведения оценивать их качество и соответственно пользоваться ими. Говоря, что амперметры *измеряют ток*, мы просто продолжаем проводить эту убедительную аналогию.

Измерение тока

Предположим, что мы укорачиваем цепь и «увеличиваем ток», что обнаруживается по более яркому свечению ламп, включенных в цепь. Опыты, подобные опыту 4, показывают, что при усилении

теплового действия тока усиливаются и магнитное и химическое действия: электромагниты, включенные в цепь, притягивают сильнее, а в ваннах с растворами ускоряются химические превращения. Перечисленные действия электрического тока — это все, что мы о нем знаем. Поэтому было бы более реалистичным говорить, что *сами эти эффекты* представляют собой электрический ток, чем называть их следствием течения какой-то таинственной субстанции. И какую бы точку зрения ни принимать, если мы хотим придумать способ измерения тока, нам придется воспользоваться одним или несколькими действиями тока. Мы характеризуем ТОК всеми его действиями и выбираем одно из них для измерения величины тока. Аналогично мы поступили с температурой — ввели понятие новой величины и определили способ ее измерения путем выбора измеряемого эффекта (например, расширение тел) и измерительного прибора (например, ртутный термометр). В этом курсе мы будем измерять токи по их химическим действиям. Сделав такой выбор, воспользуемся электролитической ванной для осаждения меди и будем взвешивать медь, выделяющуюся на приемной пластине.



Фиг. 25. Химические действия тока складываются.

В качестве меры электрического ТОКА возьмем СКОРОСТЬ ВЫДЕЛЕНИЯ МЕДИ в электролитической ванне. Выбранная величина *определяет* то, что мы понимаем под электрическим током. Она выражает *опытное* утверждение, которое говорит лишь о следующем:

1. Опыт показывает, что, когда мы изменяем цепь с целью увеличить ток (о чем судят по тепловому и магнитному эффектам), химическое действие тока тоже усиливается (ускоряется).

2. При разветвлении цепи сумма скоростей выделения меди в ветвях равна скорости выделения меди в магистрали.

Это убеждает нас в разумности сделанного выбора. В то же время, поскольку представление об электрическом токе, подобно представлению о температуре, является искусственным, мы можем выбрать определение по своему усмотрению (если только мы не пользуемся несколькими противоречащими друг другу опреде-

лениями). Выбранная нами единица измерения тока соответствует раннему этапу развития учения об электричестве, отсюда ее несколько странная размерность. Она определяется так:

1 *ампер* — это величина такого тока, при прохождении которого через электролитическую ванну происходит выделение меди со скоростью 0,000 000 329 *кг* меди в секунду.

Вообще мы определим способ измерения тока следующим образом: ток измеряется скоростью переноса меди в электролитической ванне с раствором медного купороса [1].

Тогда

при силе тока 1 *а* выделяется 0,000 000 329 *кг* меди в секунду,
при силе тока 2 *а* выделяется 0,000 000 658 *кг* меди в секунду,
при силе тока 20 *а* выделяется 0,000 006 580 *кг* меди в секунду,
при силе тока I*а* выделяется $(I)\cdot(0,000\,000\,329)$ *кг* меди в секунду.

Этим определяется наша единица силы тока 1 *а* (сокращение от 1 *ампер*) и общий способ измерения; этим же соотношением определяется сила тока [2] как некая величина, пропорциональная скорости выделения меди при электролитическом осаждении.

Задача 4. Калибровка амперметра

а) Предположим, что в цепи течет неизвестный по величине ток. Разорвем цепь и включим в разрыв электролитическую ванну для осаждения меди. До-

[1] В русской терминологии величину электрического тока называют также «силой тока».— *Прим. перев.*

[2] Имея в виду наше определение, основанное на скорости электролитического осаждения меди, мы можем экспериментально исследовать магнитное действие тока, как это сделали Ампер и Эрстед свыше ста лет тому назад. В последние годы физики пришли к соглашению изменить логический порядок построения стандартной системы электрических единиц и понятий. Современное официальное определение единицы силы тока исходит из того, что токи пропорциональны их магнитным действиям. *Ампер* определяется через силу взаимодействия между двумя параллельными проводниками, по которым текут токи, обусловленную магнитным полем токов. (В соответствии с этим подходом магнитное действие пропорционально току по определению, а химическое действие тока подлежит экспериментальному изучению.) Эта новая система упрощает задачу точного воспроизведения эталонов. Система, которая принята в нашем курсе, основанная на скорости электроосаждения меди, позволяет скорее прийти к ясному пониманию вопросов в целом и лучше представлять себе, что такое амперы, кулоны и т. д., поэтому мы и будем пользоваться этой системой. Обе системы одинаково логичны, но смешение их было бы страшно нелогично.

пустим, мы установили, что за 1000 сек (примерно $^1/_4$ часа) выделилось 0,00658 кг меди. Какова величина тока?

б) Каким образом вы могли бы убедиться (не вступая в противоречие с логикой), что ток после включения в цепь электролитической ванны остался тем же, что и раньше?

в) Небольшой химический завод производит 12 000 т электролитической меди в год. Если завод работает круглосуточно, то какой величины ток он потребляет? (Произведите приближенную оценку, приняв 1т=900 кг.)

Количество электричества. Электрический заряд

Субстанцию, которая течет по цепи, называют «электричеством»; это название существует уже 300 лет. Вместо туманного слова «электричество» мы говорим теперь о количестве электричества, о заряде электричества, об электрическом заряде или просто о заряде. Таким образом, теперь мы говорим о токе как о потоке зарядов. Обсуждая здесь эту тему, мы не объясняем, что такое заряд, а говорим лишь, что заряд есть нечто такое, что течет, когда появляется ток. Можно представлять себе заряд как огромный сгусток электронов. Позже мы встретимся с зарядами в опытах, посредством которых впервые изучались заряды,— в опытах с покоящимся электричеством. Единица измерения заряда («порция электричества») получила название *кулона* [1]. Один кулон дает силу тока 1 *а* за 1 *сек*. Ампер — это то же самое, что *кулон/сек*.

$$\text{сила тока в амперах} = \frac{\text{заряд в кулонах}}{\text{время в секундах}}.$$

При силе тока 1 *а* мы говорим, что через поперечное сечение проводника в каждой точке цепи проходит один кулон за каждую секунду. Поставим в каком-либо месте цепи в качестве наблюдателя гнома и поручим ему считать проходящие мимо него кулоны. При силе тока 1 *а* он будет отсчитывать 1 *кулон* каждую секунду, 60 *кулон* в минуту, 3600 *кулон* в час. При силе тока 2 *а* он отметит 2 *кулон* в секунду и т. д. Поскольку ток в цепи всюду один и тот же, наш наблюдатель отметит в любой части цепи одну и ту же скорость прохождения кулонов. С течением времени любой выделенный

---

[1] По имени французского экспериментатора Кулона, который установил примерно 170 лет тому назад закон для сил взаимодействия между такими порциями электричества. В дальнейшем вместо привычного термина «заряд» часто используется образное выражение «кулон».

кулон (предположим, нам удалось бы его пометить) сделает полный круг по цепи и начнет движение снова [1].

Таким образом, кулон — это порция электричества. Если через лампочку течет ток, то мы представляем себе, что по нити накала проходят кулоны бесконечной вереницей. Но, говоря все это, мы не объясняем электричества. Знаем ли мы электричество так же, как знаем, что такое длина, что такое справедливость или десятицентовая монета? Если мы пытаемся узнать, «чтó это *на самом деле* такое», понять изначальную природу электричества (что бы это ни значило), то мы снова возвращаемся в круг старых, как мир, проблем философии, и как ученые мы никогда этого не узнаем. С другой стороны, нам известно об электричестве, токах и электронах очень много: мы знаем о них по тому, что они *делают*. В этом смысле мы хорошо понимаем, чтó они собой представляют, и рассчитываем узнать еще больше.

Поток зарядов

Итак, следуя первоначальным представлениям и современным знаниям об электронах, мы говорим, что при силе тока 5 *а* через сечение проводника в каждой точке цепи *проходит 5 кулон электрического заряда в секунду*. Расходомеры, установленные в различных точках замкнутого водяного контура, будут показывать одно и то же значение, если не происходит изменения сечения трубопровода и отсутствует утечка. Если наблюдатель зафиксировал в каком-либо месте расход 5 *л/сек*, то такое же значение отметит другой наблюдатель в любом другом месте. Мы представляем себе, что через сечение трубопровода проносится 5 *л* воды в секунду. (Действительная скорость самой воды зависит, кроме того, от ширины трубы, и в отношении электрического тока справедливы

---

[1] Простые опыты ничего, однако, не говорят нам об их фактической скорости, поскольку мы не знаем общего числа кулонов, текущих по проводнику. Мы считаем теперь, руководствуясь косвенными данными атомной физики, что полный движущийся заряд, представляющий собой ток в металле, составляет огромную величину. В куске тонкой медной проволоки длиной 30 *см* ток осуществляют примерно 10^{22} электронов (считая по два «электрона проводимости» на атом). Заряд каждого электрона равен $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *кулон*, следовательно, суммарный движущийся заряд близок к 1600 *кулон*. Если по проволоке идет ток силой 1 *а*, то должен происходить дрейф электронов вдоль цепи со скоростью примерно $^1/_{50}$ *см/сек* или 1,2 *см* в минуту. (Этот дрейф — он-то и представляет собой ток — накладывается на хаотическое движение электронов в кристаллической решетке атомов металла, а *это* движение, как утверждает квантовая теория, происходит с огромной скоростью, свыше 320 *км/сек*.)

такие же соображения.) При силе тока 5 *а*, согласно нашим представлениям, мимо любого наблюдателя проносится 5 *кулон* в секунду. *Ток силой Iа означает, что через каждое сечение проводника в любой точке цепи проходит I кулонов в секунду.*

В соответствии со сказанным мы определяем *один кулон* как *такой заряд, который выделяет 0,000 000 329 кг меди* или переносит эту массу через электролитическую ванну. (Такую ванну называют, довольно неудачно, медным вольтаметром; это название не следует путать с вольтметром.) Заметьте, сколько внимания приходится в новой, непривычной для нас области науки уделять формулированию ясных, непротиворечивых определений, или хотя бы описательных определений и честно признаваться в своем невежестве, и в то же время с какой легкостью мы пользуемся знаниями, основанными на соображениях здравого смысла, занимаясь, скажем, измерениями давления.

Мы до сих пор не объясняли, что представляет собой кулон, а просто определили кулон как нечто такое, что...

Задача 5

Продолжите начатую выше фразу.

Электроны

Другие, исторически более ранние опыты дают основание считать кулоны «зарядами» электричества, подобными зарядам, которые мы собираем, проведя авторучкой по рукаву, при трении подошв обуви о пол или при запуске воздушного змея в грозу. Более поздние опыты указывают на существование крошечных частиц, несущих каждая отрицательный заряд $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *кулон*, отрицательных электронов, которые играют роль универсальных строительных кирпичиков в атомах и носителей тока в металлах. Тогда мы можем сказать, сильно упрощая существо дела, что «кулон — это сгусток электронов, содержащий огромное количество этих мельчайших электрических зарядов». Многим это кажется удобным объяснением, и никакого особого вреда такое представление о кулонах не приносит. В проводе движущийся кулон, действительно, представляет собой целую армию движущихся электронов, которая насчитывает примерно 6 000 000 000 000 000 000 электронов. Рисуя грубую картину,— в известной степени опасную, ибо она содержит вполне определенные детали, которые мы не можем наблюдать

экспериментально,— мы представляем себе, что часть электронов свободно передвигается в проволоке подобно молекулам газов [1]. Эти электроны изредка сталкиваются с массивными атомами металла (атомы закреплены в кристаллической решетке, но колеблются, обладая некоторой тепловой энергией). Когда по проволоке течет ток, «свободные» электроны движутся вдоль нее, увлекаемые электрическим полем. Они приобретают небольшую добавочную кинетическую энергию, но теряют снова в среднем столько же энергии при столкновениях с атомами металла. Таким образом, мы представляем себе, что электроны перемещаются по проволоке, сталкиваясь время от времени с препятствиями. Движение электронов можно уподобить тому, как мальчишки ватагой сбегают вниз по лесистому склону холма, набирая кинетическую энергию и теряя ее, когда они из озорства налетают на деревья. Не удивительно, что колебания атомов металла усиливаются, свидетельствуя об увеличении тепловой энергии.

Опыт 5. *Проверка амперметра.* Приняв определение единицы силы тока, основанное на скорости выделения меди при электроосаждении, проверьте шкалу вашего амперметра. Это можно проделать путем следующего демонстрационного опыта, чтобы избежать трудностей взвешивания малых количеств выделившейся меди. Через цепь, состоящую из большой электролитической ванны и амперметра, пропустите максимально возможный для амперметра ток. Ток должен входить в электролитическую ванну через провод, идущий *к центру* ванны; вторым электродом должен служить большой лист меди. Промойте, высушите и взвесьте медный лист до и после пропускания тока. Ток следует пропускать в течение определенного промежутка времени, скажем 1000 *сек.* Запишите результаты взвешиваний и показания амперметра. Вычислите ток, оцените абсолютную и относительную (в процентах) ошибки прибора [2].

---

[1] Современная квантовая теория утверждает, что эти «свободные» электроны обладают чрезвычайно высокой кинетической энергией, при всех температурах в 200 раз превышающей кинетическую энергию, которую они имели бы в результате «равного распределения энергии по степеням свободы» при комнатной температуре. Они имеют также очень большую среднюю длину свободного пробега, которая уменьшается при повышении температуры, отчего электрическое сопротивление возрастает.

[2] Не следует затемнять существо этого опыта процедурой точного взвешивания. Опыт важен как часть цельного курса изучения электричества. Если взять амперметр для больших токов и лист меди площадью что-нибудь 30×30 *см*^{2} или больше, то выделившуюся медь легко взвесить, так что всем будет виден результат. Электролитическое осаждение, проводимое как демонстрационный опыт, может быть рассчитано на продолжительное время, в течение которого будут рассматриваться другие вопросы.

Задача 6. Сравнение амперметров

а) Предположим, что несколько студентов хотят прокалибровать имеющиеся в их распоряжении амперметры. Есть ли необходимость проделывать опыт с электролитической ванной несколько раз? Дайте обоснование вашему ответу.

б) Предположим, некоторые из студентов не участвуют в опыте, но впоследствии хотят произвести калибровку своих амперметров. Каким образом они могут наверняка обойтись без повторения опыта с электролитическим осаждением меди?

в) Какие предположения лежат в основе способа, указанного вами в качестве решения задачи б)?

г) Если используется слишком маленькая медная пластинка, то, хотя электрохимические эффекты остаются теми же самыми, новая медь собирается на пластинке настолько быстро, что образуются веточки меди, и некоторые из них отваливаются. Как это повлияет на вывод о точности амперметра?

д) Хороший способ быстро просушить медную пластинку состоит в следующем. Пластинку промывают сначала в водопроводной, потом в дистиллированной воде, затем промывают ее в спирте и поджигают остатки спирта на пластинке. Даже при этой обработке медь тускнеет, соединяясь с кислородом, и пластинка становится тяжелее. Как это увеличение веса пластинки скажется на выводе о точности амперметра?

е) Почему перед первым взвешиванием пластинку также следует промыть и высушить?

ж) Обычно составляют цепь и пропускают в течение короткого времени ток перед первым взвешиванием пластинки. После этого пластинку вынимают, промывают, высушивают и взвешивают. Укажите два преимущества этой методики.

з) Сама по себе проверка амперметра с помощью электролитического осаждения меди — скучное занятие, которое носит характер формального эксперимента. Какой тогда смысл проделывать такую проверку в этом курсе?

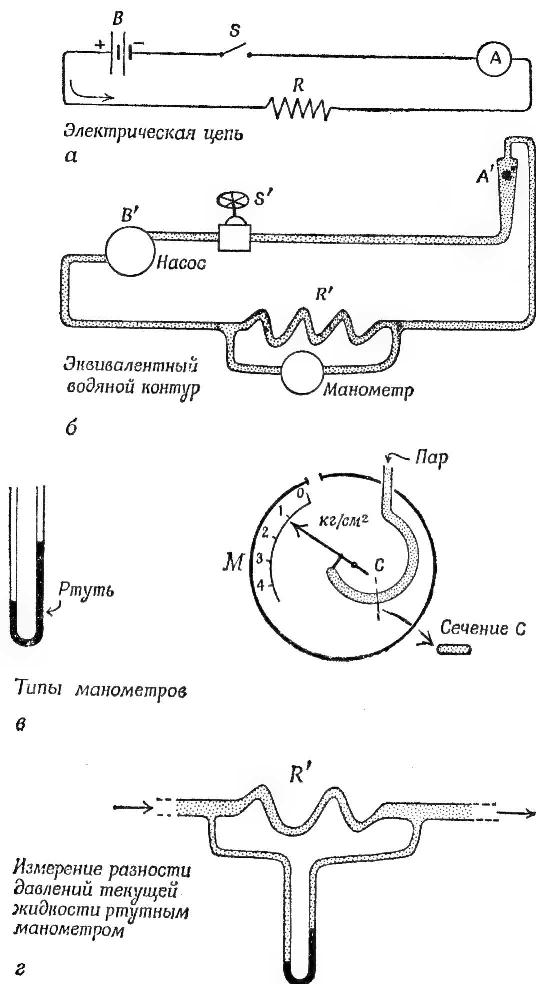
Практически было бы слишком нудным делом производить подобную калибровку амперметра во многих точках его шкалы. Чтобы уяснить метод калибровки, достаточно проделать ее в одной точке. В случае необходимости можно воспользоваться стандартными градуированными амперметрами и сравнить с ними свои приборы.

Что такое вольтметры?

Инженерам для наблюдения за передачей и распределением электроэнергии и физикам, занимающимся электрическими измерениями, нужны не только амперметры, но и вольтметры. Что же такое вольтметры?

Уподобляя электрическую цепь замкнутому водяному контуру, мы приходили к выводу, что вольтметр соответствует манометру. Вскоре вы сами в этом убедитесь, используя вольтметры

для измерений энергии, отдаваемой зарядами на различных участках цепи. Эта область применения вольтметра, где они по-



Фиг. 26. Еще раз об аналогии между цепями.

настоящему необходимы, будет рассмотрена в следующем разделе. Однако, приступая к пользованию вольтметром, полезно иметь

представление о нем как об электрическом манометре. На фиг. 26, *а* и *б* показаны электрическая цепь и аналогичный ей водяной контур. Батарея B соответствует насосу B', выключатель S — крану S'. Амперметр A соответствует расходомеру A'. Сопротивление R соответствует узкой трубке R', внутри которой имеется много препятствий.

Как установил Джоуль, при движении жидкости по такой трубке выделяется некоторое количество тепла. Если мы хотим измерить давление, под действием которого создается поток в трубке R', то нужно воспользоваться каким-нибудь манометром. В качестве него можно взять U-образную трубку, наполненную ртутью. В этом манометре разность уровней ртути измеряет разность давлений между концами R'. U-образная трубка на самом деле измеряет *разность* давлений даже в том случае, если с одной стороны имеется вакуум. В обычном манометре для пара, какие устанавливают на паровых котлах, внутри имеется гибкая трубка C, которая разгибается под действием давления пара. Пар входит в трубку C с одного конца, другой конец закрыт. Трубка имеет не круглое, а почти прямоугольное сечение, поэтому давление пара заставляет ее разворачиваться, подобно тому как развертывается бумажная игрушка «тещин язык». Деформация трубки C измеряет давление, что отмечается с помощью стрелки, перемещающейся перед шкалой. Чем больше давление, тем больше разворачивается трубка C, развиваются бóльшие упругие силы, которые уравновешивают силу давления пара.

Задача 7. Манометры

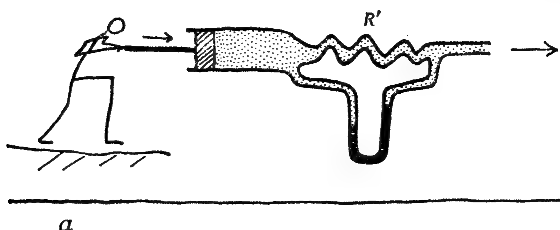
а) В манометре M (фиг. 26, в), когда стрелка уходит под действием пара в крайнее положение, ее можно вернуть к началу шкалы двумя способами. Во-первых, снять давление пара. Во-вторых, не изменяя давления пара . . . (Указание. В таких манометрах предусмотрено маленькое отверстие в наружном кожухе.)

б) Как вы думаете, принимая во внимание (а), измеряет ли манометр на самом деле «абсолютное давление» или разность давлений? Большинство манометров, применяемых на практике, в действительности измеряет разность давлений. На фиг. 26, г такой манометр измеряет разность давлений, которая поддерживает поток через трубку-сопротивление R'.

Задача 8. Причина и следствие

Правильно ли говорить, что разность давлений создает поток, или следует утверждать, что поток создает разность давлений? А может быть, можно

говорить и так, и так? Рассмотрите кратко поставленные вопросы:
а) С точки зрения человека, приводящего в действие насос (фиг. 27, а).



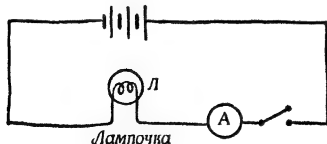


Фиг. 27. К задаче 8.

Две точки зрения на напор и поток. Что является причиной, а что следствием?

б) С точки зрения пилота самолета, в носовой части которого имеется отверстие (фиг. 27, б).
в) Можно ли в каждом случае определить экспериментально, что является причиной, а что следствием?

Опыт 6. *Вольтметр.* 1) Начертите и составьте схему, показанную на фиг. 28, и *добавьте* к ней вольтметр— электрический манометр — с целью измерить «разность давлений», необходимую для горения лампочки *Л*. (Пора использовать вольтметр для исследований. Если вы не уверены в том, как его следует подсоединить, испробуйте сами различные варианты. «Неправильные» варианты тоже могут дать полезные сведения.)



Фиг. 28. Опыт 6 (1).

2) Включите в цепь переменное сопротивление, чтобы можно было менять ток. Обратите внимание на то, как изменение тока влияет на показания вольтметра. (Это грубый предварительный опыт; измерения вы будете производить позже.)

Электрический ток и энергия

Основное применение электрических токов в современной цивилизации состоит в гибкой, быстрой и непрерывной передаче энергии. Провода, идущие от генераторов электростанции к моторам на заводе, действуют как идеальный бесшумный трансмиссионный ремень, который к тому же дает возможность регулировать передаточное отношение. Нити электрических лампочек накаливаются с помощью энергии сжигаемого угля или падающей воды на расстоянии многих километров от этих источников энергии. В начале прошлого столетия, прежде чем Закон Сохранения Энергии окончательно утвердился как великий закон природы, было установлено, что электрические батареи «потребляют» имеющиеся в батареях химикалии, когда они накаливают нити или вращают моторы. Генераторы, получившие распространение после батарей, оказывалось труднее вращать, когда они давали ток лампам или моторам, чем без нагрузки. Исследования Джоуля позволили установить замечательную взаимную связь между электрической, химической и тепловой энергиями, с одной стороны, и механической энергией — с другой.

Электрическая цепь в нашем представлении

Постарайтесь представить себе, как электрическая энергия переносится током в различные части цепи. Кулоны — скопления электронов — движутся по цепи нескончаемым потоком. Они выходят из батареи, обладая изрядной потенциальной энергией (на каждый кулон, выходящий из 6-вольтового автомобильного аккумулятора, приходится 6 *дж*); заряды получают энергию, благодаря электрическому полю, и расходуют ее, продвигаясь по цепи. Они мчатся по толстой проволоке, почти не теряя энергии на этом отрезке своего пути.

В проволоке с более слабой проводимостью кулоны протискиваются в трудных условиях, спотыкаясь, запинаясь, налетая на атомы — в результате этого колебания атомов проволоки усиливаются, тепловая энергия атомов растет. В более тонкой проволоке электроны должны дрейфовать при той же величине тока,— быстрее, приобретая и теряя *больше* кинетической энергии, отчего и увеличивается нагрев проволоки. Проходя через электромотор, электроны преодолевают возникающее при их движении противодействие, словно давят на воображаемый поршень; при этом они отдают энергию, которая переходит в форму механической энер-

гии. Наконец, электроны снова входят в батарею, которая за счет необходимых химикалиев дает им новый запас энергии для очередного путешествия по цепи.

Даже внутри самой батареи есть некоторое сопротивление, из-за которого часть энергии теряется в виде тепла. В хороших автомобильных аккумуляторах это сопротивление мало, и тепловые потери невелики, если не считать случаев, когда потребляется очень большой ток. При включении стартера потери энергии на нагрев могут быть очень большими. Случайное соприкасание пластин аккумулятора, при котором внутри него происходит короткое замыкание, может привести к выделению очень большого количества тепла, вызывающему коробление пластин; в результате этого режим короткого замыкания становится еще более тяжелым, и аккумулятор приходит в негодность.

Напряжение

Мы представляем себе, что кулоны, преодолевая сопротивление в цепи, отдают энергию, которую они, получив от батареи, несут по проволоке. В батарее при этом происходят химические превращения. Джоуль установил, что количественно такие же химические превращения происходят, если те же вещества просто смешать в стакане, но в этом случае выделяется тепло.

Задача 9

Если поместить батарею и всю цепь целиком, включая химикалии, проволоку и все остальное, в химический стакан, то в нем выделится тепло. Когда Джоуль поместил химические ингредиенты прямо в стакан и наблюдал выделение тепла, куски металла, например цинка и меди, которые он брал, касались друг друга. С какой точки зрения этот последний «чисто химический» опыт можно все же рассматривать как опыт из области электричества?

Когда батарея включена в электрическую цепь, внутри нее не происходит выделения тепла из-за взаимодействия химикатов, тепло выделяется в проволоке (если включить в цепь электромотор, то можно получить механическую энергию). Амперметр говорит нам о том, насколько быстро кулоны движутся по проволоке, но мы не можем сказать, какое выделяется количество тепла (или энергии другого вида), пока не узнаем, кроме того, *сколько энергии отдает каждый кулон*, проходя по проволоке. Количество энергии, отдаваемой каждым кулоном, т. е. энергия, передаваемая источником одному кулону, очень важная и удобная величина для расчета

энергии, отдаваемой в электрической цепи; мы будем называть ее *напряжением*. Предположим, у нас есть какой-то прибор, указывающий, что каждый кулон, проходя по проволоке, отдает 4 *дж* тепла. При этом амперметр говорит нам, что по проволоке идет ток силой 3 *а* (или 3 *кулон/сек*). Значит, *каждую секунду через поперечное сечение проволоки проходит 3 кулон, каждый из которых отдает 4 дж*. Следовательно, ток выделяет энергию с интенсивностью 12 *дж в секунду* или 12 *вт* [1]. Цепь преобразует электрическую энергию в тепловую с интенсивностью 12 *вт*.

Энергию, отдаваемую единицей заряда, полезно знать. В принципе мы могли бы измерить ее, зафиксировав некоторую порцию кулонов, прошедших через электромотор, поднимающий груз, и измерив потенциальную энергию, приобретенную грузом. Практически это было бы сложно и неточно, так как в реальных моторах часть подводимой к ним электрической энергии растрачивается, переходя в тепло. Вместо этого мы пользуемся измерительным прибором, изготовленным на основе более поздних сведений об электричестве,— *вольтметром*. Он измеряет энергию (в джоулях), передаваемую каждым кулоном, которая переходит из электрической в тепловую и другие формы энергии. Вольтметр измеряет отношение джоуль/кулон. Мы дадим единице 1 джоуль/кулон наименование 1 *вольт* в честь итальянского ученого Алессандро Вольта, который изготовил первые батареи.

Есть вольтметры, которые производят истинные измерения силы и вводят измеренное значение в расчет: СИЛА·РАССТОЯНИЕ/

---

[1] Это первый из многих очень важных расчетов, которые проделывают в электротехнике. Пусть вас не смущают научные термины. Вместо «джоуль энергии» читайте «буханка хлеба», а вместо «кулон» — «грузовик», тогда наши рассуждения будут выглядеть следующим образом. Если через мой двор ежедневно проезжает 3 грузовика и с каждого грузовика мне дают по 4 буханки хлеба, то сколько буханок хлеба я получаю в день? *Ответ*:

3 ГРУЗОВИКА В ДЕНЬ·4 БУХАНКИ С ГРУЗОВИКА=12 БУХАНОК В ДЕНЬ.

Это арифметика начальной школы. Многие важные расчеты в электротехнике столь же просты. Для проверки убедитесь, что после сокращения получаются, как в приведенном в тексте расчете, разумные единицы. Например, если бы вы по недомыслию произвели деление, то получили бы:

$$\frac{\text{4 БУХАНКИ С ГРУЗОВИКА}}{\text{3 ГРУЗОВИКА В ДЕНЬ}}, \quad \text{или} \quad \frac{4}{3}\cdot\frac{\text{БУХАНКА}\cdot\text{ДЕНЬ}}{\text{ГРУЗОВИК ГРУЗОВИК}},$$

т. е. 1,33 буханка·день на грузовик в квадрате — полная бессмыслица. Остерегайтесь медика, который не силен в математике и, деля число таблеток на больного на число больных в день, прописывает таблетко-дни на больного в квадрате!

/заряд (в кулонах). Однако обычные вольтметры представляют собой на самом деле своего рода измерители «тонкой струйки» потока. В этих вольтметрах измеряют малый ток, который через них протекает, и, используя характеристики прибора, представляют результат измерения в вольтах. Вы же должны рассматривать лабораторный вольтметр как запертый ящик, который нельзя открывать, и должны довольствоваться *непосредственной проверкой* того, что он действительно показывает число джоулей на кулон. Можно представлять себе, что вольтметр «приглашает» какой-то случайный кулон пройти через него, а потом, подобно разбойнику с большой дороги, который требует от прохожего «выложить деньги», «заставляет» кулон отдать свою энергию. Прибор проградуирован так, чтобы можно было отсчитывать энергию, отдаваемую каждым кулоном в струйке тока, текущего через вольтметр. «Энергия, отдаваемая единицей заряда»,— слишком длинное наименование для величины — объекта измерения, поэтому мы будем называть ее разностью потенциалов, или электрическим напряжением. «Разность потенциалов» — старый термин, введенный в связи с изучением неподвижно распределенных электрических зарядов. Инженеры употребляют, кроме того, жаргонный термин «вольтаж» от слова «вольт» вместо термина «напряжение».

Вольтметры как «электрические манометры»

Вольтметры покажутся вам еще более простыми в употреблении приборами, если представлять их себе как электрические манометры. Воспользуемся аналогией между электрическим током и течением воды по трубам и рассмотрим обоснование для такого представления о вольтметрах. Вольтметры изготовляют таким образом, чтобы они показали *энергию, отдаваемую каждым кулоном* на некотором выбранном участке цепи. Эта величина равна отношению

$$\frac{\text{отдаваемая энергия (на некотором участке цепи)}}{\text{число протекающих кулонов}},$$

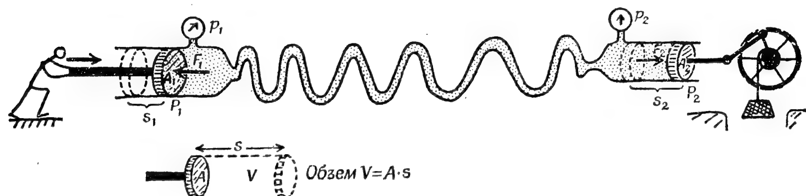
или

$$\frac{\text{отдаваемая энергия (в джоулях)}}{\text{полный заряд (в кулонах)}}.$$

Разность давлений на каком-либо участке водяного контура можно выразить таким же образом:

$$\frac{\text{отдаваемая энергия (в джоулях)}}{\text{полный объем протекшей воды (в кубических метрах)}}.$$

Правильность проводимой аналогии легко установить путем следующих рассуждений. Предположим, что мы проталкиваем воду по длинной тонкой трубе с помощью поршня P_1, находящегося в начале трубы, заставляя воду толкать поршень P_2 на дру-



Фиг. 29. Передача энергии в гидравлической цепи.

гом конце трубы. Труба обладает сопротивлением, поэтому давление p_1 в точке P_1 должно быть больше давления p_2 в P_2. Разность давлений $p_1 - p_2$ и движет воду, преодолевая силы сопротивления. Как установил Джоуль, вода на выходе имеет несколько более высокую температуру, приобретая тепло за счет некоторой доли энергии, подводимой при помощи поршня P_1. Пусть площадь поршня P_1 равна A_1 квадратных метров; поршень перемещают на расстояние s_1 метров, преодолевая давление воды p_1 ньютон/квадратный метр. Сила, которую необходимо приложить к поршню p_1, чтобы его толкать, равна произведению: ДАВЛЕНИЕ · ПЛОЩАДЬ, или $p_1 A_1$ ньютон, а энергия, передаваемая *от* источника движения поршня воде, равна произведению: СИЛА · ПРОХОДИМОЕ РАССТОЯНИЕ, или $p_1 \cdot A_1 \cdot s_1$ *дж*. Точно так же энергия, *передаваемая* водой телу, испытывающему действие поршня P_2, равна $p_2 \cdot A_2 \cdot s_2$. Но произведение: ПЛОЩАДЬ ПОРШНЯ · ПРОХОДИМОЕ РАССТОЯНИЕ представляет собой объем воды, проталкиваемой по трубе, равный V кубических метров.

$A_1 s_1 = V = A_2 s_2$, поскольку вода несжимаема. В таком случае разность между обоими количествами передаваемой энергии, которая представляет собой механическую энергию, отдаваемую воде, равна

$$p_1 A_1 s_1 - p_2 A_2 s_2 = p_1 V - p_2 V = (p_1 - p_2) \cdot V.$$

Следовательно, энергия, выделяющаяся в виде тепла в пределах рассматриваемого участка трубы, равна $(p_1-p_2)\cdot V$ *дж*. Значит,

$$\frac{\text{отдаваемая энергия (в джоулях)}}{\text{перемещаемый объем (в кубических метрах)}}=$$

$$=\frac{(p_1-p_2)\cdot V}{V}=(p_1-p_2) \text{ (в ньютон/квадратный метр).}$$

Таким образом, в гидравлической системе разность давлений p_1-p_2 ньютон/квадратный метр дается отношением: отдаваемая энергия/перемещаемый объем. Это аналогично соотношению

$$\text{«электрическая разность давлений»}=\frac{\text{отдаваемая энергия}}{\text{перемещаемый заряд}}.$$

Физики никогда, правда, не говорят об «электрической разности давлений», употребляя для выражения этого понятия термин «разность потенциалов».

Задача 10. РАЗНОСТЬ ДАВЛЕНИЙ = ЭНЕРГИЯ, ОТДАВАЕМАЯ НА ЕДИНИЦУ ОБЪЕМА — *очень удачная формулировка, характеризующая давление. Какие единицы получаются из нее для давления, если:*

а) Энергия выражается в килограммометрах, а объем — в кубических метрах?

б) Энергия выражается в джоулях, а объем — в кубических метрах? (Покажите, как вы получили свой ответ.)

в) Согласуется ли такая точка зрения на давление в том, что касается единиц с формулой кинетической теории для газов:

$$\text{давление}\cdot\text{объем}=\frac{1}{3}\text{ число молекул}\cdot\text{масса}\cdot\overline{v^2}?$$

Подключение вольтметра к электрической цепи

Величина, которую измеряют вольтметрами,— это разность потенциалов, или электрическое напряжение, смысл ее мы охарактеризовали выражением «электрическая разность давлений». Точно эта величина определяется как энергия, отдаваемая одним кулоном. Показания вольтметра зависят только от количества энергии, отдаваемой на определенном участке цепи, каким может быть, например, электромотор, или катушка из проволоки. Зажимы вольтметра должны присоединяться к концам этого участка цепи. Вольтметр измеряет разность энергий кулона на входе и на выходе участка цепи, поэтому он должен присоединяться как к входной, так и к выходной точкам точно так же, как манометр подсоеди-

няется к двум точкам, хотя часто одна из точек — это атмосфера. Таким образом, мы говорим о напряжении или разности потенциалов *между* двумя точками цепи или между выводами какого-то прибора. Мы говорим о подключении вольтметра к *зажимам* прибора. Эта последняя формулировка удобна с точки зрения начертания или составления цепей, содержащих вольтметры. Если вы не вполне уверены в своих знаниях, *то сначала вычерчивайте и составляйте схему без вольтметра, а потом подключайте вольтметр* к концам участка, на котором вы хотите измерить разность потенциалов.

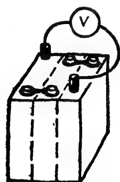
Проверка работы и точности вольтметра

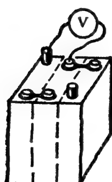
Проделайте описанные ниже опыты с вольтметрами и проверьте утверждение физиков и инженеров-прибористов о том, что вольтметры измеряют энергию, отдаваемую одним кулоном.

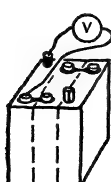
Опыт 7. *Проверка характера шкалы вольтметра.* (Вольтметр на 6 или более вольт.) Подсоедините вольтметр прямо к автомобильному аккумулятору, состоящему из трех элементов, потом подсоедините его к двум из трех элементов, потом только к одному. Запишите показания вольтметра. Убедитесь в том, что все три элемента одинаковы, путем предварительной опытной проверки, записывая показания вольтметра. Если вольтметр действительно измеряет

ЭНЕРГИЮ, ОТДАВАЕМУЮ ОДНИМ КУЛОНОМ,

то, будучи присоединен к аккумулятору, он должен сказать нам, сколько электрической энергии аккумулятор готов передать каждому кулону за счет химической энергии. Получается такая картина: аккумулятор превращает химическую энергию в электрическую потенциальную энергию, которую кулон потом, продвигаясь по цепи, отдает в другой форме (например, в форме тепловой энергии). Если кулон проходит только через один элемент аккумуляторной батареи, он приобретает соответствующее количество энергии (одна порция). Если кулон проходит через два элемента, включенных последовательно, то, согласно нашим энергетическим представлениям, он приобретает вдвое большее количество потенциальной энергии (порция + + порция), причем каждый элемент внесет свой полный вклад независимо от других элементов. Если соединить последовательно три одинаковых элемента, то приобретенная



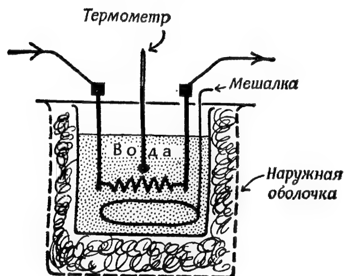




Фиг. 30. Опыт 7.

кулоном энергия возрастет втрое (порция + порция + порция). Это подтверждается экспериментальным фактом, заключающимся в том, что в каждом элементе при прохождении одного кулона происходят количественно одинаковые химические изменения независимо от того, включен в схему один элемент или два, три... элемента, соединенных последовательно. Этот опыт не доказывает, что наш прибор измеряет отношение энергия/кулон, но вы можете сказать, согласуются ли ваши наблюдения с такой точкой зрения.

Опыт 8. *Проверка шкалы вольтметра в одной точке.* Это точный опыт, он дает возможность произвести настоящую градуировку вольтметра. Составьте схему, позволяющую непосредственно измерять энергию, отдаваемую одним кулоном, и пусть вольтметр тоже «измерит» ее. Самая простая установка содержала бы проволочное сопротивление



Фиг. 31. Опыт 8.
«Калориметр» с проволочным сопротивлением и мешалкой.

R, которое отдает тепло воде, налитой в хорошо изолированный химический стакан («калориметр»). Начертите и составьте цепь из хорошей батареи, проволочного сопротивления R небольших размеров, которое должно быть погружено в воду, и переменного сопротивления, необходимого для поддержания неизменной величины тока в течение опыта. С помощью амперметра и часов измерьте число кулонов, проходящих через проволочное сопротивление, и предусмотрите необходимые средства для измерения количества выделяющегося тепла. Затем подсоедините испытуемый вольтметр так, чтобы он измерял энергию, отдаваемую каждым кулоном *в проволоке* R (не во всей цепи). Включите установку на определенный промежуток времени и следите за тем, чтобы стрелка вольтметра во время опыта оставалась у фиксированной отметки. (Если ток меняется, то записывайте его значение каждую минуту и берите среднее.) По результатам ваших измерений вычислите отдаваемую энергию в калориях, затем в джоулях, а также вычислите суммарный заряд в кулонах, который отдает эту энергию. Из полученных данных вычислите *истинное напряжение*, считая ваши измерения энергии точными. Сравните это значение с показанием измерительного *прибора* и укажите погрешность прибора.

Этот опыт трудно осуществить. Установку приходится налаживать заранее, и наши указания наверняка покажутся недостаточными. Например, сколько следует брать воды? В течение какого времени нужно пропускать ток? Как получить правильное показание вольтметра в момент включения тока? В связи с этими вопросами выявляется необходимость либо провести ряд предварительных опытов, либо иметь значительно более полные инструкции. Снабдить вас набором подробных указаний к лабораторному оборудованию, напоминающих кулинарные рецепты, значило бы следовать методике, пригодной разве что для обучения умственно отсталых детей. Это позволило бы испытать вашу прилежность, но едва ли способствовало бы развитию науч-

ного мышления. Здесь, как и в большинстве лабораторных исследований, стоит потратить время, чтобы провести грубый опыт и подумать над усовершенствованием своей аппаратуры и методики. Начните с опытов, дающих приближенные результаты, затем рассмотрите возможность оптимального использования аппаратуры с целью уменьшения ошибок. (При этом вам может потребоваться консультация людей, знакомых с вашим лабораторным оборудованием, но ее можно рассматривать лишь как общие указания экспертов, а не как рецепты поваренной книги.)

Нужно быть готовым к тому, что некоторые ошибки в вашем опыте, по всей вероятности, будут значительными.

Задача 11

Каковы таинственные «ошибки» в описанном выше опыте? Как они влияют на величину напряжения, вычисленную по данным ваших измерений,— завышают или занижают ее по сравнению с истинным напряжением? Каким образом можно бы их уменьшить?

Можно предложить значительно более надежные способы абсолютных измерений для проверки вольтметра, но они сложны и носят характер косвенных измерений[1]. Все они связаны с теми или иными измерениями силы и расстояния, тока и времени, предназначенными для определения напряжения в джоулях на кулон.

Описанный опыт демонстрирует лежащую в его основе идею. Повторять опыт в нескольких точках шкалы вольтметра не стоит: лучше поверить изготовителям вольтметров или сверить свой прибор со стандартным вольтметром, опять-таки тщательно проградуированным.

Задача 12. Сравнение вольтметров

Предположим, что вы не производили проверки своего вольтметра, но хотите быстро сверить его с уже проверенным прибором. Начертите схему, которую вы использовали бы для сравнения обоих вольтметров в нескольких точках шкалы.

Примечание. Некоторые физики любят использовать опыт с вольтметром и погружаемой в воду проволочной спиралью,

[1] Один такой способ — получаемый с его помощью результат имеет очень важное значение в теоретической электротехнике — состоит в следующем. Изготавливают очень простой генератор, напряжение которого можно вычислить непосредственно, зная его конструктивные параметры и скорость вращения и измеряя ток, создающий магнитное поле. Таким путем можно получить эталонное напряжение. (Обычно этот генератор используют для получения эталонного сопротивления, не прибегая ни к каким измерениям тока. Э.д.с. генератора компенсируют разностью потенциалов на концах сопротивления, по которому протекает ток, служащий для создания магнитного поля в генераторе. Именно таким путем пришли к эталону ома.)

предназначенный для «измерения механического эквивалента теплоты», как дальнейшее подтверждение известных результатов Джоуля и широкое обобщение закона сохранения энергии. В таком случае они не могут использовать этот опыт *также* и для проверки вольтметра. Этим физикам придется предположить, что вольтметр уже проверен, скажем, абсолютным методом по генератору, о котором говорилось в примечании на стр. 40. Эксперимент, разумеется, тот же, но последующие рассуждения будут иными. В этом курсе нам представляется более целесообразным использовать указанный опыт, чтобы хорошо разобраться в назначении вольтметра. Во всяком случае, нельзя пользоваться этим опытом сразу и с той и с другой целью, это было бы совершенно антинаучно.

Если вы приняли точку зрения, согласно которой вольтметры измеряют энергию, передаваемую единицей заряда, т. е. что каждый вольт равен отношению джоуль/кулон, то можно перейти к двум важным вопросам: к расчету мощности и экспериментальному исследованию «закона Ома».

Мощность

Если, накопив достаточно опыта в электротехнике, вы окончательно удостоверились в том, что напряжение — это действительно энергия, передаваемая единицей заряда, то вы можете приступить к изучению проблемы электроснабжения. С этой целью предлагаем вам проработать следующие задачи:

Задача 13. Расчет мощности

Предположим, что амперметр, включенный в цепь лампочки, показывает силу тока 3 а. Лампочка подключена к сети 120 в.

Вопросы:

а) *Какое количество энергии рассеивается лампочкой в виде тепла и излучения за 10 сек*[1]?

б) *Какую мощность «потребляет» лампочка, т. е. насколько быстро лампочка преобразует электрическую энергию в тепловую и др.?*

Ответы:

а) 1. *Сила тока равна 3 а.* ЭТО ЗНАЧИТ, ЧТО КАЖДУЮ СЕКУНДУ ЧЕРЕЗ ЛАМПОЧКУ ПРОХОДИТ 3 КУЛОНА.

[1] Заполните оставленные для ответов пропуски на машинописной копии текста задачи.

Следовательно, за 10 сек через лампочку проходит заряд, равный ______________ · ______________ .
единицы

2. *Напряжение на лампочке равно 120 в.* ЭТО ЗНАЧИТ, ЧТО КАЖДЫЙ КУЛОН, ПРОХОДЯЩИЙ ЧЕРЕЗ ЛАМПОЧКУ, ОТДАЕТ *120 дж (лампочке). (Иначе говоря, в лампочке на каждый кулон преобразуется 120 дж из электрической энергии в тепловую и др.) Объединяя данные, содержащиеся в пунктах 1 и 2, получаем, что*

ЭНЕРГИЯ, ВЫДЕЛИВШАЯСЯ *за 10 сек,* =

= (__________ · __________) · (__________ · __________) =
единицы

= ______________ · ______________ .
единицы

б) МОЩНОСТЬ=СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ= $= \frac{\text{ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ}}{\textit{Время}}$.

= ______________ · ______________ .
единицы

Но для единицы дж/сек принято сокращенное наименование «ватт».

Следовательно, мощность... = ______________ · ______________ .
новые единицы

Задача 14. Мощность

Автомобильная лампочка, подсоединенная толстым проводом к 6-вольтовому аккумулятору, потребляет 12 а. Вычислите потребляемую мощность в ваттах, используя видоизмененную форму записи ответа предыдущей задачи.

Задача 15. Мощность

Электромотор потребляет от 100-вольтового источника питания ток величиной 20 а. Три четверти мощности идет на поднятие груза. Оставшаяся четверть теряется в виде тепла в моторе.

Вопросы:

а) Вычислите полезную мощность.
б) Часто мощность электромотора указывают в лошадиных силах. Подсчитайте приближенно мощность этого электромотора в л. с., имея в виду его полезную мощность.
в) С какой скоростью поднимается вверх груз 50 кг?
г) Предположим, что для поднятия того же груза используются источник питания с напряжением 1000 в и электромотор, работающий не от 100 в, а от 1000 в. Какой ток потреблял бы новый мотор и почему? (Предполагается, что речь идет о подъеме точно такого же пятидесятикилограммового груза с такой же скоростью; коэффициент полезного действия нового мотора также равен 75%.)

д) Какими, по вашему мнению, преимуществами и недостатками должна обладать система с напряжением 1000 в по сравнению со 100-вольтовой? (1 л. с. равна 746 вт, или приблизительно 3/4 киловатта. Примите 1 квт равным 4/3 л. с., а 1 л. с. =75 кГм/сек.)

Ответы:

а) СИЛА ТОКА *равна 20 а.* ЭТО ЗНАЧИТ, ЧТО...
НАПРЯЖЕНИЕ *равно 100 в.* ЭТО ЗНАЧИТ, ЧТО...
Следовательно, энергия, выделяющаяся за каждую секунду, равна...
Поэтому МОЩНОСТЬ *равна* ______________ · ______________ .
единицы

ПОЛЕЗНАЯ МОЩНОСТЬ *равна* ______________ · ______________ .
единицы

б) Учитывая полезную мощность, величина мощности мотора должна быть близкой к ______________ *л. с.*

в) Согласно б), ПОЛЕЗНАЯ МОЩНОСТЬ = ______________ *= л. с. =* = ______________ *кГм/сек.*

Действующая СИЛА *должна быть равна 50 кГ, и если груз поднимается со* СКОРОСТЬЮ *X м/сек, то мощность (выраженная через X) равна* ______________ *кГм/сек.*

Следовательно, значение ______________ *должно быть таким же, как* ______________ *кГм/сек. Поэтому* СКОРОСТЬ ГРУЗА *X должна быть равна...* ______________ *м/сек. П. п. г) и д). См. вопросы.*

Алгебраическая формула для мощности

Вместо того чтобы повторять подробные выкладки с амперами и вольтами в каждой задаче, можно выбрать раз и навсегда символы, записать с их помощью решение этих задач и получить выражение, позволяющее определить мощность в каждом случае. Если этот путь кажется вам разумным, если вы считаете, что он дает экономию времени, то действуйте и пользуйтесь полученным результатом. (Не заучивайте его как формулу, позволяющую быстро получить правильный ответ на экзамене, ибо на экзамене, если он разумно проводится, вас спросят, откуда следует формула!)

ЗАДАЧА

Лампочка (или электромотор, или какой-нибудь другой прибор) потребляет от источника питания с напряжением V в ток силы I а. Вычислите энергию, выделяющуюся за t сек, и потребляемую мощность.

ОТВЕТ

Сила тока равна I а. ЭТО ЗНАЧИТ, ЧТО ЗА КАЖДУЮ СЕКУНДУ ЧЕРЕЗ ЛАМПОЧКУ ПРОХОДИТ I КУЛОНОВ.

Поэтому за t сек через лампочку проходит заряд, равный $I \cdot t$ кулонам.

Напряжение равно V в. ЭТО ЗНАЧИТ, ЧТО КАЖДЫЙ КУЛОН, ПРОХОДЯЩИЙ ЧЕРЕЗ ЛАМПОЧКУ, ОТДАЕТ V ДЖ.

Итак, за t сек через лампочку проходит $I \cdot t$ кулонов, каждый из которых отдает V дж. Таким образом, энергия, выделившаяся за t сек, равна $It \cdot V$, или $V \cdot I \cdot t$ дж.

МОЩНОСТЬ = ЭНЕРГИЯ, ОТДАННАЯ В ЦЕПИ В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ =

$$= \frac{\text{ЭНЕРГИЯ, ОТДАННАЯ В ЦЕПИ}}{\text{ВРЕМЯ}} =$$

$$= \frac{V\ I\ t}{t} = V \cdot I \text{ дж/сек, или ватт.}$$

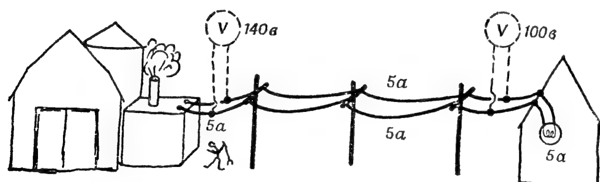
Таким образом,

$$\text{МОЩНОСТЬ} = V \cdot I \text{ ватт.}$$

Мощность равна $V \cdot I$ ватт. ЭТО ЗНАЧИТ, ЧТО КАЖДУЮ СЕКУНДУ ЛАМПОЧКЕ ПЕРЕДАЕТСЯ $V \cdot I$ ДЖ, КОТОРЫЕ В НЕЙ РАССЕИВАЮТСЯ.

Задача 16. Линия электропередачи

Рассмотрим упрощенную модель линии электропередачи. Впоследствии мы дополним ее, чтобы приблизиться к реальной схеме, а пока нам важно познакомиться с постановкой задачи. На ферме имеется своя электростанция, которая снабжает энергией коттедж, удаленный от нее на некоторое расстояние.



Фиг. 32а. К задаче 16.

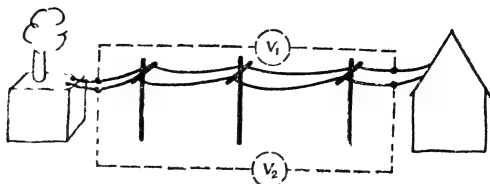
Коттедж потребляет силу тока 5 а. Ток идет от электростанции по медному проводу, укрепленному на столбах, проходит через лампочки накаливания в коттедже и течет обратно по такому же медному проводу, укрепленному на столбах. Вольтметр, подключенный в коттедже, показывает напряжение 100 в на каждой лампочке (и, следовательно, на подводящих проводах).

а) Вычислите мощность, которую потребляет коттедж.

б) Вычислите мощность, которую дает электростанция.

в) Где, по вашему мнению, расходуется разница в мощности б) — а)? В какой форме?

г) На фиг. 32б изображена схема с двумя дополнительными вольтметрами V_1 и V_2. Каковы их показания? (Чтобы ответить на этот вопрос, нужно проделать расчет, который потребует от вас внимания и должен сопровождаться объяснениями.)



Фиг. 32б.

Задача 17. Экономические соображения

В старом театре для освещения сцены используется большое число 100-ваттных ламп накаливания. Администрация театра, желая идти в ногу с прогрессом, считает нужным сделать освещение более ярким и предлагает заменить каждую лампу 200-ваттной.

а) Считая, что новые лампы обладают такой же световой отдачей (самое большее 2 свечи на ватт), скажите, как повлияет смена осветительных ламп на общее количество света? На суммарный ток?

б) Как вы думаете, почему смена ламп приведет к увеличению нагрева проводов, проложенных в стенах театра? *(Приведите простые соображения общего характера, не производите расчетов. Даже если вы прибегнете к формулам, которыми пользуются инженеры, и рассчитаете нагрев, ваш ответ будет неверным. Увеличение нагрева настоящих медных проводов больше, чем следует из формулы!)*

в) Предположим, как это было бы в настоящем театре, где столкнулись с подобной задачей, увеличение нагрева б) считают опасным.

1) Где была бы скрыта опасность — в лампах накаливания или в стенах театра?

2) Каким образом можно избежать опасности, выбрав другое напряжение сети (и соответственно заменив лампочки)?

ЗАКОН ОМА

Работы Ома

Напряжение и ток — удобные характеристики электрических цепей. Одно из главных применений электричества заключается в быстрой транспортировке энергии из одного места в другое и передаче ее потребителю в нужной ему форме. Произведение разности потенциалов на силу тока дает мощность, т. е. количество энергии, отдаваемой в цепи в единицу времени. Чтобы проследить за потреблением мощности в системе коммунального энергоснаб-

жения или в лабораторном опыте, очевидно, необходимы два прибора: вольтметр и амперметр [1]. Нельзя ли обойтись одним из приборов и вычислить мощность по показанию этого прибора и какой-либо характеристике цепи, вроде ее «сопротивления»? Эта идея оказывается весьма плодотворной. Что такое СОПРОТИВЛЕНИЕ провода, или вообще цепи в целом? Обладает ли проволока, подобно водопроводным трубам или трубам вакуумной системы, постоянным характерным свойством, которое можно было бы назвать сопротивлением? В трубах отношение

$$\frac{\text{РАЗНОСТЬ ДАВЛЕНИЙ, «СОЗДАЮЩАЯ ПОТОК»}}{\text{РАСХОД}}$$

обычно является постоянной характеристикой трубы. Точно так же тепловой поток в стержне подчиняется простому соотношению, в которое входит разность температур, площадь поперечного сечения стержня и длина. Открытие такого же соотношения для электрических цепей представляет собой редкий пример успешных поисков, основанных на многообещающей догадке.

Георг Ом, немецкий школьный учитель, приступил к поискам этого соотношения в 1820-х годах. Он стремился к известности, которая открыла бы ему университетские двери, и выбрал область исследований, сулившую особые преимущества. Ом был сыном слесаря, так что знал, как вытягивать металлическую проволоку разной толщины для своих опытов. В то время нельзя было купить проволоку самых разных типов, как это можно сделать в наше время. Ом сам изготовлял проволоки для своих опытов и экспериментировал с ними, пробуя разные дли́ны, разные толщи́ны, разные металлы, и даже проводил опыты при различной температуре, варьируя каждый фактор поочередно, как все настоящие ученые. Батареи были еще слабые, они давали ток непостоянной величины, поэтому Ом пользовался в качестве генератора термопарой, горячий спай которой был помещен в пламя. Он использовал грубый магнитный амперметр, а разности потенциалов — Ом называл их «напряжениями» — измерял путем изменения температуры или числа термоспаев.

Учение об электрических цепях было еще молодо. После того как примерно в 1800 г. изобрели батареи, оно стало развиваться с быстротой растения в тропиках. Проектировались и изготовлялись,

---

[1] Вольтметр и амперметр могут быть объединены в один прибор, носящий название ваттметр, но такие приборы дороги, довольно неудобны в употреблении и не находят повсеместного применения.

часто вручную, различные приборы, открывались законы, формировались понятия и терминология, развивались общие принципы — все это вело к более глубокому пониманию явлений. Углубление знаний об «электричестве», с одной стороны, носило характер становления новой области физики, а с другой — создавало базу для бурного развития электротехники: батареи, генераторы, системы электроснабжения для освещения и электрического привода, электропечи, моторы... словом, все, из чего складывается наша электрическая цивилизация. Открытия Ома имели огромное значение как для развития учения об электричестве, так и для развития прикладной электротехники. Они позволили легко предсказывать свойства цепей сперва для установившегося постоянного тока, а потом (в эквивалентной форме) для переменных токов. Книга Ома, насчитывавшая примерно 250 страниц, которую он опубликовал в 1826 г., изложив свои теоретические выводы и экспериментальные результаты, была встречена насмешками. Метод грубого экспериментирования по заранее намеченному плану казался мало привлекательным в эпоху увлечения философией; так,

«...министр просвещения высказал мнение, что „физик, проповедующий подобную ересь, недостоин преподавать естественные науки“. Ому не оставалось ничего другого, как уйти с занимаемой им должности преподавателя. Не добившись назначения в университет по той причине, что к его трудам не относились как к работе экспериментатора, Ом теперь потерял должность потому, что в других кругах его труды рассматривали как экспериментаторскую работу.

В течение шести лет Ом жил в нищете, без уверенности в будущем, испытывая чувство горького разочарования. Постепенно, однако, его труды получили известность, сначала за пределами Германии. Ома стали чтить за границей, и соотечественники были вынуждены нехотя признать его у себя на родине. Наконец, в 1849 г., 22 года спустя после публикации его книги, Ом получил должность профессора Мюнхенского университета. Энергичная деятельность на этом посту приносила Ому большое удовлетворение, он занимал его в течение пяти лет вплоть до смерти, последовавшей в 1854 г.» [1].

Ом открыл простой Закон, устанавливающий связь между силой тока и напряжением для отрезка проволоки (для части цепи, всей цепи). Кроме того, Ом открыл правила, которые позволяют определить, что́ изменится, если взять проволоку другого размера. Закону присвоено имя знаменитого исследователя. Попытайтесь сами повторить

[1] Из книги Л. У. Тейлора, «Physics, The Pioneer Science».

открытие Ома, проделав описанный ниже лабораторный опыт с помощью современного оборудования.

Опыт 9. *Ток и напряжение. Как зависит напряжение между концами отрезка проволоки, обладающей определенным сопротивлением, от* СИЛЫ ТОКА, *текущего по ней?* Воспользовавшись в качестве испытуемого объекта куском «проволоки, обладающей сопротивлением» [1], установите, как зависит напряжение между концами проволоки от силы тока, текущего по ней. Составьте схему, которая позволила бы пропускать по проволоке измеренный ток; при этом следует предусмотреть возможность изменения тока в широких пределах. Подключите вольтметр так, чтобы измерять напряжение на отрезке проволоки. Проделайте серию измерений в пределах возможно более широкого диапазона изменения тока. Проанализируйте результаты ваших измерений и попытайтесь найти какое-нибудь соотношение. Кроме того, постройте график для наглядного представления результатов измерений и попытайтесь сделать выводы из этого графика.

Опыт 10 *(необязательный). Повторите опыт 9, используя проволоку из какого-нибудь чистого металла, например железа или вольфрама* (в вакууме).

Опыт 11 *(необязательный). Повторите опыт 9 с лампой накаливания с угольной нитью.*

Опыт 12 *(необязательный). Повторите опыт 9, воспользовавшись пластинкой из тирита* [2]. (Она служит в качестве предохранительного устройства, не давая току возрасти сверх определенной величины.)

Опыт 13. *Радиолампа. Повторите опыт 9 с простейшей радиолампой (диодом).* Эта лампа состоит из стеклянного баллона, в который впаяны два металлических электрода; внутри баллона создан очень хороший вакуум. Один из электродов — анод, другой — вольфрамовая нить накала, которую можно нагревать, пропуская по ней электрический ток. Исследование вольтамперной характеристики этой лампы не просто познакомит вас с одной деталью радиоприемника. Это начало изучения электронных потоков, электронных пушек, осциллографов, телевизионных трубок и т. д.

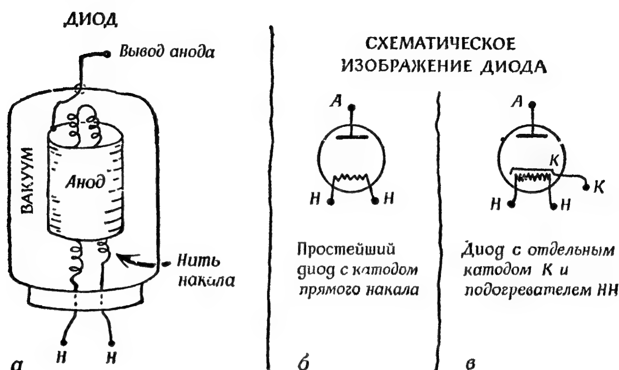
Если вы располагаете обычным источником питания, будь то, скажем, 120-вольтовая батарея или генератор, то для изменения напряже-

---

[1] Всякая проволока обладает сопротивлением. Выражение «проволока, обладающая сопротивлением», вводит в заблуждение. Однако у тонкой проволоки и проволоки, изготовленной из специальных сплавов, сопротивление настолько превышает сопротивление толстой медной проволоки одинаковой с ней длины, что употребление этого выражения оказывается уместным, ибо оно подчеркивает контраст. Для этого опыта вам должны дать проволоку из специального сплава, имеющего относительно большое сопротивление и мало меняющего его с изменением температуры. У чистых металлов, таких, как медь, железо и т. д., сопротивление возрастает примерно на 4% при увеличении температуры на 10 градусов; в то же время у некоторых сплавов сопротивление остается почти постоянным при изменении температуры. Так, у константана, сплава из 60% меди и 40% никеля, при возрастании температуры на 10 градусов сопротивление изменяется на 0,05% или того меньше. Сплав этот дешев и как раз подходит для данного опыта.

[2] Керамика на основе карбида кремния с нелинейной зависимостью тока от напряжения.— *Прим. перев.*

ния, прикладываемого к нашей двухэлектродной радиолампе, потребуется реостат с огромным сопротивлением, которого может не оказаться. Вместо такого реостата следует воспользоваться остроумной схемой, называемой «делителем напряжения», которая описана ниже.

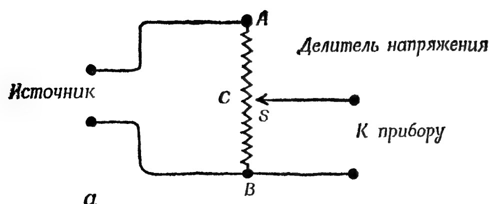


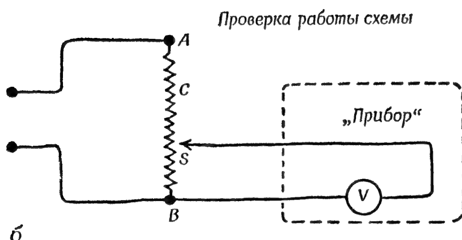
Фиг. 33. Простейшая радиолампа (диод).

Делитель напряжения

Делитель напряжения предназначен для получения плавно изменяемого напряжения от источника высокого постоянного напряжения. Возьмите реостат (переменное сопротивление), который можно без опасения включить на полное сопротивление в электрическую сеть. Подсоедините крайние точки A и B к источнику питания. Затем зажим испытуемого прибора соедините проводами со скользящим контактом S и одной крайней точкой B. Если скользящий контакт находится вверху, у точки A, то прибор оказывается подключенным к точкам A и B. Какое напряжение приложено в этом случае к прибору? Если скользящий контакт находится внизу, у точки B, то оба зажима прибора будут подключены к точке B. Какое напряжение приложено к прибору в этом случае? Если скользящий контакт находится посредине между A и B, скажем в точке C, то прибор будет подключен к точкам C и B. Подумайте, какое при этом напряжение будет приложено к прибору. Чтобы проверить свое предположение, проследите за рассуждением, проведенным ниже, а затем составьте схему, используя в качестве вашего прибора вольтметр.

Предположим, что в этой схеме полное напряжение источника питания равно 120 *в*. Значит, кулон, проходя по сопротивлению от A до B, отдает 120 *дж*. На полпути в точке C кулону останется отдать только 60 *дж*. Если кулон станет следовать дальше по оставшемуся участку сопротивления, то он отдаст 60 *дж*. Если же кулон изберет обходной путь: от точки C через подключенный прибор в B, то он по-прежнему отдаст остальные 60 *дж*. Поэтому с точки зрения прибора приложенное к нему напряжение равно 60 *дж/к*, т. е. 60 *в*. (Это простое рассуждение справедливо в том случае, когда «прибор» обладает высоким сопротивлением и, следовательно, «отвлекает» на себя относительно малый ток. Если сопротивление прибора сравнимо с сопротив-



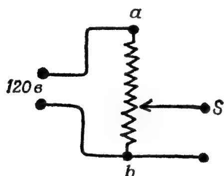


Фиг. 34. Делитель напряжения.

лением AB, то наше рассуждение придется видоизменить. Кроме того, мы должны будем соблюдать осторожность, чтобы не пережечь участок AS.)

Задача 18. Применение делителя напряжения

В качестве делителя напряжения используется однородное по длине сопротивление со скользящим контактом. Сопротивление подключено к 120-вольтовому источнику питания, как показано на рисунке. Предположим, что скользящий контакт находится на расстоянии $^3/_4$ длины ab, считая от точки a.



Фиг. 35. К задаче 18.

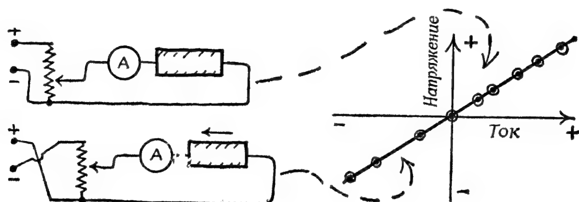
1) Какое напряжение приложено к прибору, подсоединенному к точкам b и S?
2) Дайте объяснение или обоснование вашему ответу на вопрос 1).

Опыт 13. *А*) *Радиорезистор* [1]. Возьмите источник, дающий высокое напряжение, например 120 *в* постоянного тока, и делитель напряжения, чтобы можно было прикладывать к нашей радиолампе регулируемое напряжение. При этом нужно, как и раньше, измерять на-

[1] Термином «резистор» обозначают деталь, которая служит для введения в цепь сопротивления.— *Прим. перев.*

пряжение на выводах лампы и текущий через нее ток. Чтобы применение новой схемы не мешало наблюдать характеристику нового испытуемого элемента цепи, *проверьте схему сначала на знакомом элементе — обычном проволочном сопротивлении (резисторе)*. Для того чтобы можно было проводить сопоставление с радиолампой, резистор должен иметь очень большое сопротивление.

Чтобы убедиться в том, что характеристика испытуемого элемента симметрична, нужно производить питания, а также проводов, которые подходят *к* обоим измерительным приборам. Есть значительно более простой способ достичь того же самого результата: воспользуйтесь им! Постройте график, изображающий характеристику радиорезистора. Обычно при исследовании закона Ома откладывают напряжение по вертикальной оси, а силу тока — по горизонтальной. Радиоинженеры, выражая графически характеристики своих ламп, напротив, откладывают по вертикальной оси силу тока, а по горизонтальной — напряжение. Поэтому

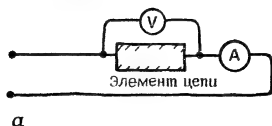


Фиг. 36.

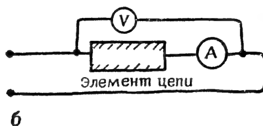
измерения, пропуская ток через него сначала в одном направлении, потом в противоположном. На первый взгляд изменить направление тока при измерении нетрудно: просто поменять местами точки присоединения проводов, идущих от батарей или розетки, как показано на фиг. 36. Однако, в этом случае вольтметр и амперметр оба будут давать отклонения стрелок в обратную сторону. Вполне правильно считать теперь напряжения и токи отрицательными. Но это плохо для самих измерительных приборов, поэтому следует также поменять местами присоединения проводов на каждом измерительном приборе и добавлять знак минус к их показаниям. Итак, следует поменять местами точки присоединения проводов *от* источника и вам следует откладывать силу тока по вертикальной оси, а напряжение — по горизонтальной, чтобы удобно было сопоставлять этот график с вашим следующим графиком для радиолампы. Расположите начало координат своего графика в центре листа бумаги, тогда вы сможете наносить на него и отрицательные значения величин. Если ваш резистор «подчиняется» закону Ома, то график, очевидно, должен получиться таким, как на фиг. 36, но резистор может нагреться при больших токах, и картина изменится. (Если вы как следует подумаете и будете проделывать опыт быстро, то сможете выяснить, связан ли нагрев резистора с какими-либо отклонениями в характеристике, которые вы наблюдаете.)

Трудности в применении вольтметра как измерителя ответвляющегося малого тока

В случае цепей с очень высоким сопротивлением возникает новая трудность. Дело в том, что через сам вольтметр протекает малый ток — ведь обычные вольтметры представляют собой по существу измерители весьма малого тока. Нужно, чтобы подключение вольтметра, отбирающего на себя некоторую долю тока, не вносило ошибки в измерение тока через исследуемый участок цепи. На фиг. 37 показаны две схемы: *а* и *б*. Допустим, сила тока,



а



б

Фиг. 37.

текущего через испытуемый элемент, равна нескольким миллиамперам [1], и сила тока через вольтметр тоже составляет несколько миллиампер. Какую схему вы бы выбрали, *а* или *б*? Будьте внимательны при выборе схемы для этого опыта и других опытов, в которых через исследуемый участок цепи течет малый ток [2].

Опыт 13. *Б) Радиолампа (нить накала холодная).* После того как вы исследовали радиорезистор и набросали для него график, замените резистор радиолампой — диодом. Присоедините вашу цепь к аноду радиолампы и одному концу ее нити накала [3]. Опять-таки проделайте опыт во всем диапазоне напряжений от 0 до +100 *в* или больше и от 0 до —100 *в*. Постройте график по полученным результатам, какими бы они ни оказались.

Опыт 13. *В) Радиолампа (нить накала нагрета).* Теперь снова проделайте опыт с радиолампой, но у которой нить накала (катод) нагрета. Нагрев нити накала производится током вспомогательной цепи, подключенной к батарее. Перечертите свою цепь, добавив к ней цепь накала, содержащую батарею, реостат, амперметр и выключатель. Замкните цепь накала, установив значение тока, рекомендуемое для выбранной лампы, и повторите предыдущие измерения. Снова постройте график, откладывая положительные и отрицательные значения.

Опыт 13. *Г) Знак зарядов.* Есть основания полагать, что нагретая нить накала испускает какие-то электрически заряженные частицы, способные переносить ток от нити

[1] Миллиампер — одна тысячная часть ампера, 0,001 *а*.

[2] Амперметры имеют очень малое сопротивление, поэтому напряжение на амперметре соответственно очень мало.

[3] В некоторых лампах имеется вывод от центра нити накала или от окружающего ее покрытия, называемого катодом. Если у взятой вами лампы есть такой вывод, то его нужно использовать вместо одного из концов нити накала.

накала к аноду. Какой знак заряда должен быть у таких носителей тока, плюс или минус? *Исследуйте внимательно аппаратуру и с помощью необходимых рассуждений придите к ответу на этот важный вопрос, исходя из ваших опытов.* Подобная радиолампа пригодится вам в дальнейших опытах.

СОПРОТИВЛЕНИЯ

Сопротивление и единицы его измерения

Опыты показывают, что простое соотношение, установленное для «проволоки, обладающей сопротивлением», является универсальным. Для большинства твердых проводников (и некоторых видов электролитических ванн, а иногда даже для проводящих газов) отношение

$$\frac{\text{НАПРЯЖЕНИЕ МЕЖДУ КОНЦАМИ ПРОВОДНИКА}}{\text{СИЛА ТОКА, ТЕКУЩЕГО ЧЕРЕЗ ПРОВОДНИК}}$$

при постоянной температуре представляет собой постоянную величину. Мы называем эту постоянную «сопротивлением» проводника. Следовательно,

$$\text{СОПРОТИВЛЕНИЕ} = \frac{\text{НАПРЯЖЕНИЕ МЕЖДУ КОНЦАМИ ПРОВОДНИКА}}{\text{СИЛА ТОКА, ТЕКУЩЕГО ЧЕРЕЗ ПРОВОДНИК}}$$

и при употреблении обычных единиц равно отношению

$$\frac{\text{НАПРЯЖЕНИЕ в вольтах}}{\text{СИЛА ТОКА в амперах}}.$$

Таким образом, сопротивление должно измеряться отношением вольты/ /амперы, т. е. числом вольт на ампер. Поскольку сопротивление часто встречается в электротехнических расчетах, единице сопротивления присвоено более короткое наименование: один вольт на ампер называют одним омом. Иначе говоря, «омы» — это сокращение для «вольт/ампер». Часто для максимальной краткости единицу «ом» записывают греческой буквой ω или Ω (малая и большая омега, последняя буква греческого алфавита).

Когда мы говорим, что сопротивление провода 5 *ом* (или 5 Ω), мы имеем в виду, что НА КАЖДЫЙ АМПЕР СИЛЫ ТОКА, ТЕКУЩЕГО ПО ПРОВОДУ, МЕЖДУ КОНЦАМИ ПРОВОДА ДОЛЖНО БЫТЬ ПРИЛОЖЕНО НАПРЯЖЕНИЕ 5 *в*.

Километр медного телефонного провода обладает сопротивлением несколько десятков ом. Километр силового кабеля обладает сопротивлением, составляющим доли ома или самое большее несколько ом. Сопротивление электрической лампочки составляет сотню ом или около того.

ЗАКОН ОМА В КРАТКОЙ ЗАПИСИ

$$\frac{\text{НАПРЯЖЕНИЕ}}{\text{СИЛА ТОКА}} = R$$

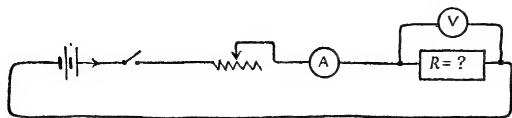
Принятая форма записи

$$\frac{\text{ВОЛЬТЫ}}{\text{АМПЕРЫ}} = \text{ОМЫ}$$

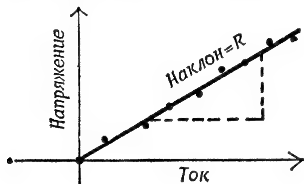
Жаргонная формулировка

Измерение сопротивлений

Чтобы измерить сопротивление, которое, как мы предполагаем, «подчиняется» закону Ома, возьмите пару значений напряжения и силы тока, отсчитанных по измерительным приборам. Если сопротивление очень велико, то вместо амперметра нужно взять миллиамперметр. Если сопротивление очень мало, то вместо вольтметра следует взять милливольтметр.



а



б

Фиг. 38. Измерение сопротивления.

Если построена вольтамперная характеристика проводника в виде графика, то сопротивление равно отношению напряжение/сила тока или наклону графика.

Инженерам-электрикам часто требуется знать сопротивление линий электропередачи, телефонных проводов, обмоток электромоторов. Вы тоже встретитесь с задачами по электротехнике, в исходные данные которых входят сопротивления. Существуют остроумно устроенные приборы, позволяющие измерять сопротивление, не подвергая испытуемый элемент нагреву большими токами, но часто вполне можно обойтись простым способом, который вы применяли в ваших опытах. В измерениях, проводимых в опытах 14—19 (см. ниже), пользуйтесь именно этим способом.

Опыт 14. *Измерение сопротивления отрезка провода или катушки.* Если вы приняли, что проволока «подчиняется закону Ома», т. е. что для нее характерно некоторое постоянное значение отношения напряжения к силе тока, то вам достаточно взять лишь одну пару измеренных значений силы тока и напряжения. Можно взять другую пару независимых значений для проверки, но если вы не собираетесь начать сызнова общее исследование нового элемента электрической цепи, то нет никакого смысла производить всю серию измерений. Снимите пару достаточно точных показаний приборов и вычислите сопротивление. (Помните, что измерения, при которых отсчет берется в самом начале шкалы измерительного прибора, вблизи нуля дают бóльшую *процентную* ошибку, чем измерения, при которых показания измерительного прибора снимаются в средней части шкалы.)

Опыт 15. *Измерьте сопротивление резистора (например, с маркировкой «2000 ом»).* Чтобы произвести одно измерение, не обязательно использовать делитель напряжения, однако необходимо иметь в виду,

что в измеряемый ток не должен входить ток, текущий через вольтметр.

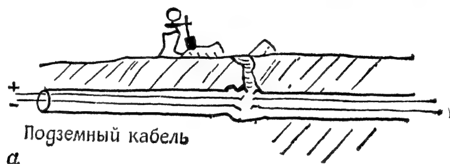
Опыт 16. *Измерьте сопротивление вольтметра, которым вы пользуетесь.*

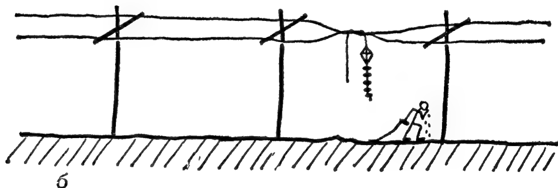
ЭЛЕКТРОЛИЗ И ЗАКОН ОМА

Опыт 17. *Исследуйте вольтамперную характеристику электролитической ванны с медными электродами* [1], предназначенной для электроосаждения меди.

Опыт 18. *Исследуйте вольтамперную характеристику электролитической ванны с подкисленной водой*, в которой при протекании тока на платиновых электродах выделяются кислород и водород [2]. Получающаяся характеристика такой электролитической ванны может ввести в заблуждение, и чтобы этого не произошло, нужно придерживаться следующей методики. Возьмите в качестве источника 6- или 8-вольтовый аккумулятор и подключите к нему прибор для электролиза воды *без реостата*. Вы можете прикладывать напряжения 2 *в*, 6 *в* и промежуточное значение, но вам, очевидно, придется оставить неисследованной область в пределах от 0 до 2 *в*. Набросайте график в виде ряда экспериментальных точек. Можно ли провести прямую вблизи точек этого графика? Можно ли его истолковать? Это будет рассмотрено ниже.

Опыт 19 *(необязательный). Обнаружение неисправности в кабеле или проводах.* Предполагая, что справедлив закон Ома, определите место повреждения в модели линии телефонной проводной связи. Провода воздушных линий и подземные кабели могут подвергаться разного рода разрушительным воздействиям. При эксплуатации линий проводной связи и трасс электропередачи требуется определить место повреждения и направить к нему ремонтников.





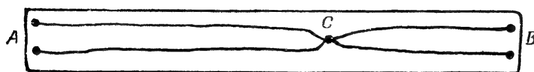
Фиг. 39. Отыскание места повреждения.

[1] Электроды — это проволоки или пластины, через которые ток входит в электролитическую ванну и выходит из нее.

[2] Такой электролитической ванне неудачно присвоено наименование «водяной вольтаметр» — не путать с вольтметром, с которым она не имеет ничего общего.

При этом желательно не посылать велосипедистов для обнаружения запутанных проводов или землекопов, необходимых для вскрытия всего кабеля, ибо то и другое сопряжено с затратами времени и денег. Поэтому для обнаружения места повреждения и определения его удаления от концов линии пользуются электрическими методами. Определить место полного разрыва внутри кабеля, как на фиг. 39, *а*, трудно, зато определение места короткого замыкания вследствие касания двух проводов (фиг. 39, *б*) не представляет труда. (Причина? Птицы, лопата садовника.)

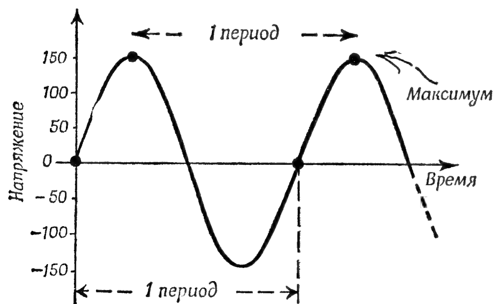
Вам даются два провода, моделирующие, скажем, линию от Нью-Йорка (*A*) до Бостона (*B*) и обратно. Провода скручены в одной точке (*C*) для имитации короткого замыкания и закрыты кожухом, скрывающим место скрутки. Произведите измерение в *A*, затем перенесите свои приборы и произведите измерение в *B*. Измерьте длину провода от *A* до *B* и найдите путем расчета местоположение неисправности, руководствуясь здравым смыслом и используя простые пропорции и правила арифметики. Проверьте свой расчет, либо осмотрев провода, либо спросив, где находится место повреждения. Специалисты, занимающиеся отысканием повреждений в линиях, располагают остроумными приборами для измерения сопротивлений, но принцип, на котором основан метод поиска, такой же, как здесь.



Фиг. 40. Модель телефонной линии с «повреждением».

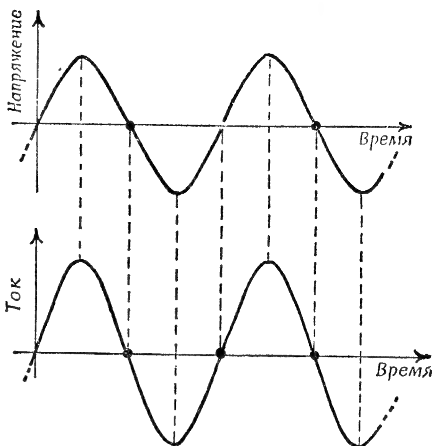
ОПЫТЫ С ИСТОЧНИКОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

По соображениям, о которых пойдет речь ниже, в современных системах электроснабжения не пользуются постоянным по величине напряжением, при котором через лампочки и другие устройства протекал бы неизменный по величине ток. Вместо этого используют переменное напряжение, которое изменяется, скажем, от +150 *в* до 100 *в*, до 50 *в*, до нуля, затем, пройдя значения —50 *в*, —100 *в*, доходит до —150 *в*,



Фиг. 41. Переменное напряжение.

а потом проходит те же значения в обратном порядке: —100 *в*, —50 *в*, 0 и снова возрастает до +150 *в* и т. д. Иначе говоря, величина напряжения совершает простое гармоническое колебание с амплитудой 150 *в* (см. гл. 10). График зависимости такого напряжения от времени представляет собой «синусоиду» (фиг. 41). Если приложить это напряжение к резистору, подчиняющемуся закону Ома, то оно в каждый момент времени создает соответствующий ток — маленькие резвые электроны обладают мгновенной реакцией,— поэтому график зависимости силы тока от времени такой же. Такой ток называют переменным и говорят об источниках напряжения переменного тока.



Фиг. 42. Разность потенциалов и ток при подключении резистора к переменному напряжению.

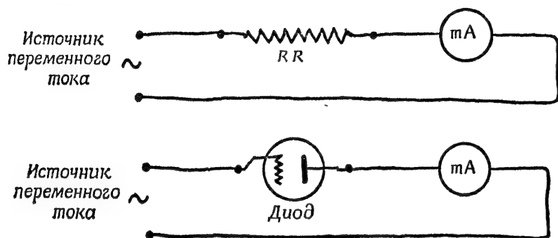
Опыт 20. *Переменный ток.* Как вы думаете, что будет, если пропустить переменный ток через лампочку? Подключите источник переменного тока к соответствующей лампочке (например, источник с напряжением 5 или 6 *в* к автомобильной лампочке). Что будет, если пропустить переменный ток через обычный амперметр? [1] Включите амперметр в цепь с лампочкой [2]. Сравните показание амперметра с показанием, которое он дает при на-

[1] Разумеется, существуют специальные амперметры, позволяющие измерять переменный ток. В приборах одного типа магнитное поле, создаваемое током, намагничивает (временно) два железных стержня. Стержни отталкивают друг друга независимо от того, в каком направлении течет ток. Один стержень неподвижен, другой, подвижный, вращается в опорах. Сила отталкивания, которая действует между стержнями и вызывает отклонение подвижного стержня, уравновешивается усилием со стороны волосяной пружины, соответственно возрастающим при увеличении отклонения. К подвижному стержню прикреплена стрелка, против которой располагается неравномерная шкала.

[2] *Следите за тем, чтобы не повредить амперметр.* Если амперметр не показывает переменный ток, то хотя стрелка его остается вблизи нуля, ток нагревает катушку, находящуюся внутри прибора, точно так же, как нить

каливании той же лампочки постоянным током от источника с таким же напряжением.

Опыт 21. *Напряжение переменного тока и вакуумный диод.* Как вы думаете, что будет, если приложить напряжение переменного тока между анодом и катодом (или нитью накала) диода?



Фиг. 43. Опыт 21.

1) Составьте цепь, показанную на фиг. 43, использовав в качестве испытуемого объекта радиорезистор (*RR*). Отметьте показание миллиамперметра.
2) Включите вместо *RR* радиолампу (с любыми вспомогательными приборами, которые вы сочтете необходимыми). Посмотрите, что показывает миллиамперметр.

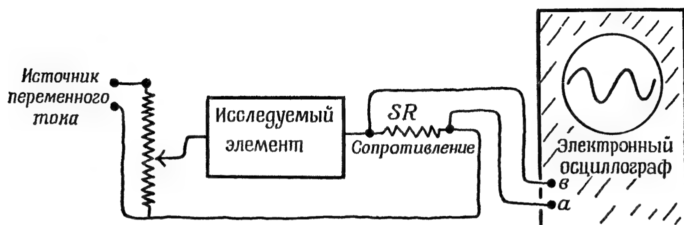
Опыт 22. *Электроны чертят графики временнóй зависимости.* Пучок электронов может служить для вычерчивания графиков временнóй зависимости точно так же, как он рисует изображение на экране телевизора. В следующей главе мы рассмотрим устройство трубок, применяемых для этой цели, теперь же мы просто воспользуемся прибором с такой трубкой для вычерчивания графиков напряжения переменного тока. Прибор этот называется электронным или катодно-лучевым осциллографом. Поперек экрана осциллографа непрерывно движется с постоянной скоростью световое пятно, образуя ось времени. Пятно смещается вверх и вниз пропорционально приложенному напряжению и, таким образом, вычерчивает график зависимости этого напряжения от времени. Чтобы увидеть, как действует диод, нужно рассмотреть на экране график зависимости тока, текущего через диод, от времени. Для этого нужно получить небольшое напряжение, изменяющееся прямо пропорционально току. С этой целью включают в цепь сопротивление, подчиняющееся закону Ома (*SR*), как показано на фиг. 44. Составьте предыдущую цепь с радиорезистором *RR*, на который подается напряжение переменного тока, и включите в цепь сопротивление *SR*, как показано на фигуре. Подсоедините проводами концы сопротивления *SR* к осциллографу: кривая на экране представляет собой график зависимости тока в цепи от вре-

---

лампы накаливания. Для верности сначала испробуйте прибор в цепи постоянного тока, потом перейдите к переменному току того же напряжения, *но не переключайте амперметр на диапазон с меньшим предельным током.*

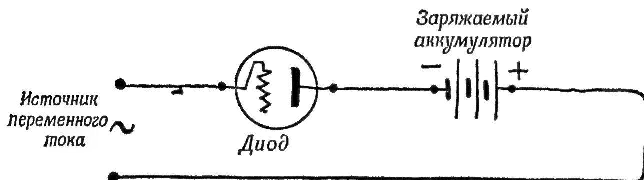
мени [1]. Теперь вместо резистора RR включите диод и снова посмотрите на экран. (Сперва подумайте над тем, как действует радиолампа, и посмотрите, не удастся ли вам предсказать форму кривой тока до того, как вы станете наблюдать ее на экране осциллографа.)

Такое действие диода, в результате которого получаются полуволны тока одного направления, называется «однополупериодным выпрямлением» [2]. Оно оказывается весьма полезным в тех случаях, когда хотят получить постоянный ток от источника напряжения переменного тока. Например, аккумуляторы заряжают, пропуская через них ток в «обратном» направлении. Для этого нужно иметь постоянный ток. Переменный ток совершенно не годится для этой цели, он мог бы даже причинить известный вред. Выпрямительные лампы позволяют получить пульси-



Фиг. 44. Опыт 22.

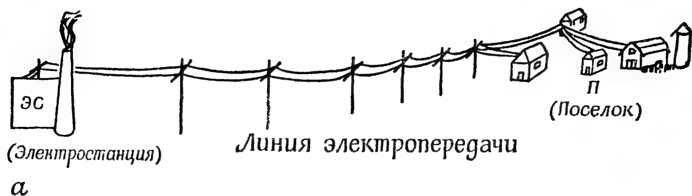
Изучение тока, текущего через компонент цепи, с помощью электронного осциллографа. Разность потенциалов на специально включенном сопротивлении SR пропорциональна току, под действием этой разности потенциалов светящееся пятно движется по экрану вверх или вниз.

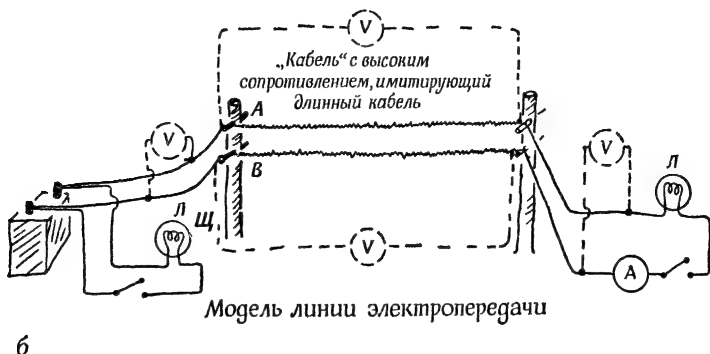


Фиг. 45. Диод как «однополупериодный» выпрямитель, используемый для зарядки аккумулятора.

[1] Электронно-лучевой осциллограф имеет собственный «датчик времени» — генератор развертки, который обеспечивает непрерывное движение светового пятна поперек экрана. Это горизонтальное движение пятна по экрану регулярно повторяется с такой частотой, что кривые, вычерчиваемые при каждом пробеге пятна слева направо, накладываются одна на другую.

[2] Любое устройство, которое пропускает ток в одном направлении и служит для получения постоянного тока (пульсирующего или неизменного по амплитуде) из переменного, называется «выпрямителем». Выпрямитель является важным узлом радиоприемников.





Исследуемый участок цепи	Ток через участок цепи, *а*	Напряжение на участке цепи, *в*	Мощность, выделяемая на участке цепи, *вт*
Поселок			→
Провод A			→
Провод B		ОБРАЗЕЦ	→
Объект электроснабжения (поселок и провода электропередачи)			
Проверка: сумма „Поселок+A+B" ——→			←
(Продолжите эту таблицу для опыта с высоким напряжением)			

в

Фиг. 46. Лабораторный опыт, посвященный изучению линии электропередачи.

а — линия электропередачи; *б* — модель линии электропередачи (в вашем лабораторном журнале вы должны начертить настоящие схемы цепи, а не просто эскизы, как на этой фигуре; «кабели» можно показать в виде резисторов); *в* — пример таблицы для записи результатов опыта.

рующий постоянный ток для зарядки аккумулятора от источника переменного тока (фиг. 45). Остроумная схема из двух диодов (иногда оба диода размещают в одном и том же стеклянном баллоне) дает «двухполупериодное выпрямление», при котором пульсирующий ток получается более близким к току с постоянной амплитудой. Поток электронов устремляется сначала через один диод, потом через другой, затем снова через первый и т. д.— подобно тому, как если доить корову двумя руками: молоко все время течет в одном направлении — в подойник. Таким образом, в аккумулятор поступают импульсы тока, который течет все время в одном направлении, проходя через диоды в виде потока электронов. Работа двухполупериодного выпрямителя рассмотрена в задаче 34. Советуем вам посмотреть соответствующий демонстрационный опыт.

Опыт 23. *Линия электропередачи.* Позже мы будем рассматривать линии электропередачи в задачах, а еще позже вернемся к линиям с источниками переменного тока. Но на данном этапе желательно, чтобы вы сами исследовали в лаборатории с помощью измерительных приборов модель системы электроснабжения.

В этом опыте наиболее плодотворным следует считать обсуждение измерений, поэтому мы дадим вам подробные указания к выполнению опыта. Протяните два провода из проволоки с высоким сопротивлением, укрепив их на стойках. Это будет модель линии электропередачи между электростанцией (ЭС) и поселком (П). Для имитации поселка, потребляющего электроэнергию, возьмите лампу накаливания (Л), а моделью электростанции пусть служит аккумуляторная батарея. На настоящих электростанциях щит управления освещается лампочкой, которая подключается в обход тех плавких предохранителей или разъединителей цепи, через которые поступает ток в поселок. Включите тоже такую лампочку ($Л_щ$). Она будет служить для сравнения с Л (измерять ток через $Л_щ$ не следует). Включите прибор для измерения тока в линии электропередачи от электростанции до поселка и обратно. Возьмите длинные соединительные провода для вольтметра, чтобы проделать необходимые измерения величин, указанных в бланке с таблицей для записи результатов.

Вычислите мощность, отдаваемую на каждом участке цепи. Проделайте арифметическую проверку очевидного ожидаемого результата. Вычислите коэффициент полезного действия, определяемый следующим образом. Коэффициент полезного действия — это отношение

$$\frac{\text{ПОЛЕЗНАЯ МОЩНОСТЬ, потребляемая поселком}}{\text{ПОЛНАЯ МОЩНОСТЬ, отдаваемая в линию электропередачи (включая потребляемую поселком)}}.$$

Теперь, оставив ту же линию электропередачи, возьмите вместо аккумулятора источник питания с высоким напряжением, скажем 120-вольтовую сеть постоянного тока. При этом придется взять другие лампочки, но можно выбрать лампочки той же мощности или той же силы света. Повторите опыт и вычисления. (На этом указания должны заканчиваться; как говорится, «делайте выводы». Если вы не сделаете сами важный вывод, значит, вы просто...)

Поражение электрическим током

Болевые ощущения при ударе током и вредное действие на организм вызываются, по всей вероятности, химическими эффектами электрического тока: возможно, появлением пузырьков газа в кровотоке и стеканием зарядов по нервам, которое сопровождается расстройством нервной системы. Таким образом, электротравмы связаны с током. Ощутимый удар током возникает при достаточно большом напряжении, под действием которого через сопротивление вашего тела протекает заметный ток. Сопротивление человеческого тела непостоянно во времени и меняется в широких пределах от одного человека к другому. Наибольшая доля сопротивления приходится на сухой наружный кожный покров: жидкая среда внутри человеческого организма содержит соли, которые делают ее хорошим проводником. Возьмитесь сухими руками за зажимы 6-вольтового аккумулятора. Ток, который входит в одну руку, проходит через ваше тело и выходит через вторую руку, слишком мал, чтобы его можно было заметить. Но миллиамперметр отметит наличие тока. Прикосновение к зажимам 100-вольтовой батареи причинит боль и представляет опасность. Если вы здоровы и у вас хорошее сердце, то ваш преподаватель может предложить вам ряд напряжений, скажем 6 *в*, 10 *в*, 20 *в* и т. д. (от сухой батареи или от делителя напряжения), чтобы вы регистрировали напряжение, ток (с помощью миллиамперметра) и болевое ощущение. Можете оценить сопротивление вашего тела. Если смочить руки, то сопротивление тела станет значительно меньше. В этом случае даже небольшое напряжение может оказаться опасным или смертельным. Все дело в токе. Если у вас влажная кожа, то вы, вероятно, будете испытывать при одном и том же токе те же болевые ощущения, но ток этот пойдет под действием *значительно* меньшего напряжения. Сила тока порядка десяти миллиампер может вызывать болевые ощущения. Сила тока в один ампер, по-видимому, смертельна. Одним из основных результатов поражения электрическим током следует считать расстройство нервного центра, управляющего дыханием. При спасении пострадавшего первое, что нужно сделать, это оторвать его от электрической сети, а затем начать делать ему искусственное дыхание.

Задача 19. Вольтметр и батарея

Вольтметр, подсоединенный к концам участка провода, по которому проходит ток, говорит нам о том, сколько джоулей энергии «отдает» каждый кулон, проходя по этому участку проволоки. Кулон не производит этой энер-

гии. Он переносит ее в форме электрической энергии (от батареи перенос происходит, по-видимому, под действием электрического поля) и освобождает в какой-то другой форме энергии, чаще всего тепловой. Таким образом, вольтметр говорит нам о количестве энергии, которое освобождает каждый кулон в какой-то форме, проходя по проволоке. Можно представлять себе вольтметр как прибор, который отбирает на пробу несколько кулонов и, пропуская их через свой механизм, выясняет, какое количество электрической энергии каждый кулон может отдать. Когда вольтметр подсоединяют к зажимам батареи или генератора, он опять-таки показывает вольты или джоули/кулон, но уже не говорит нам, какое количество энергии «переводится» каждым кулоном из электрической в тепловую от батареи или генератора. О чем говорит нам вольтметр в этом случае?

Источник энергии: э. д. с.

Источники питания — батареи и генераторы — независимо от того, как они работают, представляют собой устройства, сообщающие энергию (измеряемую в джоулях) электрическим зарядам (измеряемым в кулонах), которые перемещаются по цепи. Мы пользуемся выражением «6-вольтовый аккумулятор», не объясняя, что́ означает напряжение для аккумулятора. И вы совершенно правильно понимаете содержащуюся в этом выражении информацию как указание на величину энергии, сообщаемой кулону для каждого обхода цепи. При движении кулона по цепи происходит преобразование отдаваемой кулоном энергии *из* электрической в тепловую и т. д. В источнике питания, напротив, кулон *получает* электрическую энергию за счет других форм энергии: химической в батареях, механической в генераторах. Применительно к таким источникам электрической энергии мы не называем показание вольтметра напряжением, а присваиваем ему более громкое наименование: электродвижущая сила, или э. д. с. Э. д. с. измеряется в джоулях на кулон, т. е. в вольтах, но, говоря об э. д. с., имеют в виду преобразование энергии в обратном направлении: из химической или механической в электрическую.

Батарею, сообщающую энергию кулонам, можно уподобить двигателю тележки в аттракционе «американские горы», который осуществляет первоначальный подъем каждой тележки на гору, сообщая ей запас потенциальной энергии для спуска. Представим себе, что двигатель у подножия горы перед первым подъемом говорит тележке: «Вот тебе столько-то энергии для спуска. Используй это количество энергии, как хочешь, но не возвращайся обратно, пока не израсходуешь его полностью» [1]. Когда тележка

[1] Чаще всего тележка, получив потенциальную энергию, движется с ускорением и развивает все бо́льшую кинетическую энергию. Это соответ-

возвращается «с пустыми руками», двигатель восполняет запас энергии, поднимая тележку для следующего спуска. Мы знаем из исследований Джоуля, что химические превращения, тепловое действие тока и т. д. играют должную роль в балансе закона сохранения энергии. Мы знаем также, что при прохождении каждого кулона через батарею должно произойти всегда одно и то же количество химических превращений (подобно выделению 0,000000329 *кг* меди, но в обратном направлении). Поэтому мы полагаем, что химическая энергия должна складываться из того количества энергии, которое тратится на каждый кулон и переходит в энергию, отдаваемую кулоном в цепи, скажем в виде тепла, и любого количества энергии, которое кулон сохраняет в виде «сбережений» после обхода цепи. В обычных цепях мы не обнаруживаем признаков увеличения запаса энергии с течением времени [1]. Правда, вы встретитесь с подобными случаями, когда будете знакомиться с «большими ускорителями», которые ускоряют ионы и электроны (см. гл. 42). Таким образом, мы считаем, что каждый кулон расходует при обходе цепи всю свою потенциальную энергию. Кулоны движутся и движутся по цепи, расходуя при каждом обходе количество джоулей, численно равное э. д. с., и завершая обход цепи «с пустыми руками». Часть этой энергии расходуется в самой батарее и теряется в виде тепла совершенно бесполезно. Точно так же генератор нагревается током, который он сам вырабатывает, вследствие чего коэффициент полезного действия генератора оказывается меньше 100%.

Сводка полученных сведений об электрической цепи

Мы представляем себе кулоны как крупные сгустки электронов, которые движутся по цепи, отдавая энергию, приобретенную при каждом прохождении их через батарею. Этот поток зарядов, который мы называем током и измеряем в кулонах в секунду и амперах, одинаков во всех точках цепи. Если цепь разделяется на несколько параллельных ветвей, то ток разделяется на меньшие

ствует ускоренному движению электронов в вакууме за счет энергии батареи. В некоторых тележках, предназначенных для детей, трение настолько велико, что большая часть спуска совершается с постоянной скоростью. Определенная доля потенциальной энергии идет на нагрев рельсов и воздуха. Это соответствует прохождению тока по проводам под действием батареи.

[1] Обычно тележки останавливаются, возвратившись к месту старта. Они не возвращаются с запасом избыточной кинетической энергии, чтобы потом, на последующих спусках, двигаться все быстрее и быстрее.

токи, сумма которых равна полному току в основной цепи. Поскольку мы считаем, что кулон при полном обходе цепи отдает весь свой запас энергии, мы полагаем, что напряжения на всех участках внешней цепи должны в сумме равняться полному напряжению на зажимах батареи или генератора. Мы убеждаемся, что так оно и есть. Если из проводников, подчиняющихся закону Ома, составляется сложная цепь, то мы можем применить к ней эти представления о разветвлении токов и суммировании напряжений и рассчитать «сопротивление» группы проводников, соединенных последовательно или параллельно. (Эти расчеты имеют важное значение в технике, но здесь они нам не нужны.)

Опыты с радиолампами заставляют предполагать, что раскаленные металлы испускают отрицательно заряженные носители тока, которые мы называем электронами, и мы считаем, что электроны могут являться носителями тока в металлических проводах. Это предположение подтверждается некоторыми косвенными данными. Мы представляем себе рой электронов, беспорядочно блуждающих в решетке из атомов металла; электроны совершают дрейф под влиянием приложенного напряжения и теряют приобретенную ими кинетическую энергию при столкновениях, сообщая атомам тепло.

При электролизе (см. гл. 35), как мы считаем, носителями тока являются не электроны, а положительные и отрицательные ионы (заряженные атомы, которые потеряли или преобрели лишние электроны). Этим носителям тока тоже приходится преодолевать трение в жидкости — столкновения с молекулами,— поэтому и они теряют энергию в виде тепла; кроме того, ионам, возможно, приходится преодолевать на своем пути тормозящие электрические силы, появляющиеся при химических превращениях у электродов. Таким образом, *часть* энергии ионов превращается в химическую энергию. В электромоторах носители тока — по нашему предположению электроны — встречают на своем пути поперечные магнитные поля, которые развивают э. д. с., тормозящую движение электронов. Поэтому приложенному извне напряжению приходится продвигать электроны, *преодолевая* дополнительные силы, вследствие чего часть энергии электронов преобразуется в механическую энергию.

Закон Ома. Правила и расчеты

Опыты Ома, подтвержденные впоследствии с большой точностью для широкого диапазона токов, показали, что для металлов

и некоторых других проводников отношение напряжение/сила тока при неизменной температуре остается постоянным. Это применимо к каждому участку цепи и ко всей цепи. В последнем случае мы говорим:

$$\frac{\text{э. д. с.}}{\text{сила тока}} = \text{сопротивление всей цепи}$$

(включая сопротивление батареи или генератора).

Постоянство отношения напряжение/сила тока представляет собой важный результат опыта. В большинстве исследований постоянному отношению присваивают наименование после того, как устанавливают его постоянство. Ом планировал свои исследования, исходя из представления о сопротивлении потоку. Тем не менее неразумно говорить, будто Ом доказал, что отношение напряжение/сила тока равно уже известной величине — сопротивлению, словно сопротивление было вполне определенной характеристикой, данной (и названной) неким божеством задолго до Ома и ожидавшей, пока докажут, что она равна отношению напряжение/сила тока. Правильнее сказать, что отношение напряжение/сила тока=постоянной, *называемой* сопротивлением.

Ом установил, что при увеличении длины проволоки вдвое сопротивление удваивается: сопротивление прямо пропорционально длине проводника. При увеличении диаметра проволоки вдвое сопротивление уменьшается в четыре раза: сопротивление обратно пропорционально площади поперечного сечения проводника. Объединяя оба утверждения, мы записываем:

$$\text{сопротивление} = \frac{(\text{постоянная, } \rho) \cdot \text{длина проволоки, } L}{\text{площадь поперечного сечения, } S}.$$

Постоянная ρ называется *удельным сопротивлением*. Она представляет собой характеристику материала проволоки и не зависит от формы и размера образца (хотя она может изменяться с температурой). Обратная величина, $1/\rho$, называется *электропроводностью*; она обладает замечательным сходством с теплопроводностью. Чтобы сравнить обе величины, запишем

$$\frac{\text{разность потенциалов (напряжение)}}{\text{сила тока}} = R = \rho\frac{\text{длина проволоки}}{\text{площадь сечения}}.$$

Следовательно,

$$\text{сила тока} = \frac{1}{\rho}\,\frac{\text{площадь сечения}\cdot\text{разность потенциалов}}{\text{длина проволоки}}.$$

Но сила тока — это скорость потока электричества, т. е. электрический заряд/время. Поэтому перепишем это равенство:

$$\frac{\text{прошедший заряд}}{\text{время}} = \frac{1}{\rho}\cdot\frac{\text{площадь сечения}\cdot\text{разность потенциалов}}{\text{длина проволоки}}.$$

Тепло, проходящее по стержню благодаря теплопроводности, записывается следующим образом:

$$\frac{\text{прошедшее тепло}}{\text{время}} = (k)\cdot\frac{\text{площадь сечения}\cdot\text{разность температур}}{\text{длина стержня}}.$$

Таким образом, электропроводность ($1/\rho$) и теплопроводность (k) аналогичны. Действительно, значения обеих величин обнаруживают удивительное сходство. Металлы, будучи хорошими проводниками электрического тока, являются также хорошими проводниками тепла, а те из них, которые лучше всего проводят электрический ток, такие, как медь, серебро, алюминий, лучше всего проводят тепло. Соответствие настолько поразительно, что мы полагаем, что носители *электрического тока ответственны и за перенос тепла*.

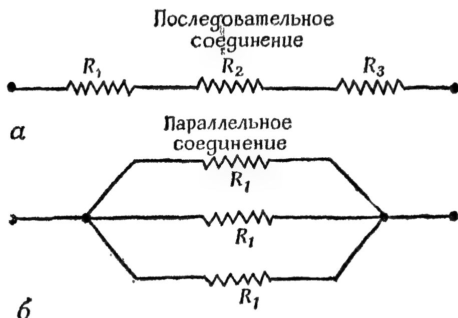
Закон Ома не универсален

Существует много материалов и приборов, которые не подчиняются закону Ома. Радиолампы, транзисторы, кристаллы минералов при плохом контакте обнаруживают несимметричные графики зависимости между напряжением и током. Графики эти искривлены, часто имеют ярко выраженные «изломы». Мы отнюдь не считаем эти исключения досадными: приборы с такими вольтамперными характеристиками используются в качестве выпрямителей (для зарядки аккумуляторов и детектирования радиосигналов) и находят другие важные применения в современной электронике. В системах электроснабжения для защиты от молний применяют прибор, изготовленный из карбида кремния, который обладает очень большим сопротивлением при обычных напряже-

ниях, но когда молния ударяет в линию электропередачи и создает очень высокое напряжение, он разрушается, причем сопротивление его становится малым. Для всех этих «нелинейных» материалов и приборов мы по-прежнему можем вычислить сопротивление, но оно не имеет постоянного значения.

Последовательное и параллельное соединения

Опыты показывают, что если несколько проводников сопротивлением R_1, R_2... и т. д. соединить последовательно, то общее сопротивление такой группы проводников R равно $R_1+R_2+...$, т. е. сумме отдельных сопротивлений. Если несколько таких про-



Фиг. 47.

водников соединить параллельно (присоединяя все проводники концами к одним и тем же двум точкам), то общее сопротивление R дается соотношением $1/R=1/R_1+1/R_2+...$и т. д. *Проводимость* такой группы проводников $1/R$ равняется сумме проводимостей отдельных проводников. Эти правила могут быть выведены из предположений о сохранении энергии и правил для сложения токов.

Температурная зависимость сопротивления

Металлы меняют свое сопротивление с изменением температуры. Сопротивление таких *химических элементов*, как медь и вольфрам, увеличивается с ростом температуры [1]. Грубо говоря, сопротивление большинства чистых металлов в широких пределах

[1] Если вы были внимательны, то могли заметить признаки этого явления в вашем первом опыте, посвященном электрической цепи.

изменяется прямо пропорционально абсолютной температуре. Сопротивление углерода уменьшается с повышением температуры. У сплавов удельное сопротивление обычно больше, чем у металлов, которые входят в их состав; сплавы с высоким удельным сопротивлением применяют для высокоомных катушек в реостатах и т. д. У некоторых сплавов сопротивление почти не меняется с изменением температуры (например, у константана, сплава 60% меди и 40% никеля, который вы, возможно, применяли в вашем первом лабораторном опыте по изучению закона Ома с целью облегчить его выполнение). Эти сплавы используют для изготовления эталонов сопротивления.

Задачи

Если известно сопротивление линии электропередачи, катушки генератора, или обмоток электромотора, то мы можем вычислить потери мощности, рассчитать силу тока, соответствующую заданному напряжению, и вообще выяснить, что́ должно произойти в цепи, не прибегая к сложным опытам. Инженеры-специалисты по проводной связи и передаче электроэнергии тщательно измеряют и записывают сопротивления своих линий. Поэтому они могут отыскивать неисправности путем простых измерений сопротивления с обоих концов линии. Предлагая вам арифметические задачи на закон Ома, мы стремились к тому, чтобы вы лучше поняли основы электротехники, а не просто теряли время на упражнения в арифметике, подставляя числа в готовые формулы. Внимательно анализируйте *результаты* ваших расчетов.

Словарь единиц измерения

Ниже дан словарь некоторых единиц измерения, который может оказаться полезным. При решении задач нельзя допускать жаргонного употребления приведенных ниже соотношений вместо названий соответствующих физических величин.

1 *джоуль* = 1 *ньютон · метр*
1 *ампер* = 1 *кулон/сек*
1 *ватт* = 1 *джоуль/сек*
1 *вольт* = 1 *джоуль/кулон*
1 *ом* = 1 *вольт/ампер*

Задачи к главе 32

Задачи 1—19 приведены в тексте главы.

Задача 20. Смысл «вольтов» и т. д.

Утверждение «сила тока в цепи равна 5 а» означает, что через каждое сечение проводников в цепи за каждую секунду проходит 5 кулонов. *Спишите следующие утверждения и дополните их аналогичным образом.*

а) Утверждение «сила тока в цепи равна . . . ампер» означает, что . . .
б) Утверждение «к небольшому нагревателю подводится мощность 10 вт» означает, что . . .
в) Утверждение «напряжение между концами проводника равно 12 в» означает, что . . .

Задача 21. Нити накала ламп

Две лампочки накаливания, А и Б, рассчитаны на различные напряжения, но обе дают одну и ту же мощность при нормальном режиме работы. Лампочка А светит на полную яркость при 6 в, Б — при 120 в.
а) Какой ток потребляет лампочка Б по сравнению с А, больший или меньший?
б) Дайте четкое обоснование вашему ответу на вопрос а).
в) Какой должна быть нить накала у лампочки Б, более короткой или более длинной, чем у лампочки А, при одинаковой толщине?
г) Какой должна быть нить накала у лампочки Б, более толстой или более тонкой, чем у А, при одинаковой длине?
д) Дайте четкие обоснования вашим ответам на вопросы в) и г).

Задача 22

Дуговая лампа устойчиво горит, когда напряжение на ней равно 70 в. Какое сопротивление нужно включить последовательно с лампой, если ее подключат к источнику с напряжением 100 в?
а) Напряжение источника 100 в. Что это означает?
б) Напряжение между концами дуги 70 в. Что это означает?
в) Какое, следовательно, напряжение должно быть на добавочном сопротивлении?
г) Если дуга потребляет силу тока 5 а, то какой ток должен течь по сопротивлению?
д) Каково должно быть сопротивление соответствующего резистора?
е) Начертите цепь, состоящую из источника питания, дуговой лампы и добавочного резистора.

Задача 23. Сопротивление лампы накаливания

а) Лампа накаливания потребляет 200 вт. Что это означает?
б) Лампа работает от 100-вольтового источника питания. Что это означает?

в) Какой ток потребляет лампа?
г) Каково сопротивление лампы, когда она горит?
(Покажите, как вы пришли к своим ответам.)

Задача 24. Электронвольты

Когда электрон движется против направления поля, его энергия возрастает благодаря действию на него поля. Если электрон переместился из одной точки в другую, разность потенциалов между которыми 1 в, то говорят, что электрон приобретает один «электронвольт» энергии (1 эв). Используя величину заряда электрона и определение вольта, вычислите значение одного электронвольта в джоулях.

(Заряд одного электрона равен — $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ кулон.)

Хотя это и отрицательный заряд (в соответствии с нашим выбором знаков), электронвольт не есть отрицательная энергия. Электрон, обладающий отрицательным зарядом, приобретает энергию, проходя отрицательную *разность потенциалов, например, —1 в.*

Задача 25

Полкилограмма урана (U^{235}) *содержит примерно 10^{24} атомов. Установлено опытом, что при делении одного атома* U^{235} *освобождается примерно 200 000 000 электронвольт энергии.*

а) Какое количество тепла выделилось бы при полном делении полкилограмма U^{235}?
б) Уголь, состоящий главным образом из углерода, дает 7000 килокалорий при сгорании 1 кг с образованием CO_2. *Во сколько раз больше энергии дают 0,5 кг* U^{235} *по сравнению с 0,5 кг угля?*
в) Масса атома углерода близка к 1/20 массы атома урана, поэтому 0,5 кг угля содержат свыше $20 \cdot 10^{24}$ атомов. Подсчитайте, какое количество энергии в электронвольтах на атом выделяется при сгорании угля. (Данные приближенные, и ваша оценка может быть верна с ошибкой 10—20%.)

Задача 26

а) Для какой величины служит единицей измерения киловатт-час?
б) Выразите 1 киловатт-час в других общепринятых единицах (не употребляя слова «ватт»).
в) Во многих городах 1 киловатт-час стоит примерно 4 цента. Предположите для удобства расчетов, что 1 киловатт-час стоит 3,6 цента. В таком случае 1 центом можно было бы оплатить . . . ?
(Укажите число и единицу измерения.)

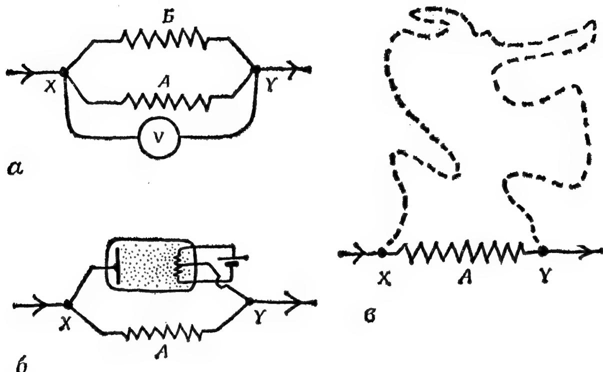
Задача 27. Общее свойство напряжения

В этой задаче рассматривается важное свойство напряжения (разности потенциалов) как величины, входящей в расчет энергии. Предположим, что в ветвях цепи на участке от X до Y, о котором идет речь ниже, нет «источников» э. д. с.— батарей, где происходят химические превращения, или генера-

торов с меняющимся магнитным полем. Тогда мы можем сказать, что каждый кулон растрачивает в какой-то форме в интервале между X и Y электрическую потенциальную энергию, принесенную из другого участка цепи.

а) *В некоторой цепи два проводника А и Б соединены параллельно, как показано на фигуре. Для измерения напряжения между концами проводника А используют вольтметр. Вольтметр показывает 100 в.*

1) *Что такое напряжение между концами проводника Б?*



Фиг. 48. К задаче 27.

2) *Предположим, что напряжение между концами проводника Б не то же самое, что напряжение между концами проводника А, скажем напряжение на Б равно 101 в. Что произойдет, если пустить 1 кулон по пути Б и затем, затратив достаточное количество энергии (из той, что при этом выделится), перетащить этот кулон обратно по пути А? Какое количество энергии мы приобрели бы (из ничего) при таком обходе? Какой вывод вы можете сделать из этого рассуждения относительно поставленного выше вопроса 1)?*

б) *Как и в задаче а), имеются две параллельные ветви. Одна из них — проводник А, концы которого совпадают с точками X и Y; другая — радиолампа, в которой из раскаленной нити накала испускаются электроны; электроны движутся в лампе между X и Y. Если напряжение между концами проводника А 100 в, то, согласно рассуждениям, проведенным в а), напряжение между выводами радиолампы должно быть . . .?*

в) *Точки X и Y соединены проводником А, как в задаче б), а другой путь от X до Y проходит не через проводник или радиолампу, а по воздуху, вдоль траектории блуждающего электрона, которому удается попасть из X в Y, избежав захвата. Если разность потенциалов между концами проводника 100 в, то какую разность потенциалов проходит заряд, движущийся вдоль указанной траектории электрона?*

г) *Какое общее утверждение можно сделать относительно разности электрических потенциалов между двумя точками X и Y при условии отсутствия «источников»?*

Задача 28

Электрический заряд, проходя разность потенциалов, приобретает электрическую энергию и отдает ее в какой-то другой форме. В какой форме отдается энергия

а) В проволоке?

б) Когда к потоку электронов в радиолампе прикладывают напряжение?

в) Когда пропускают ток через аккумулятор в обратном направлении, «заряжая» его?

Задача 29. Задача о системе электроснабжения

Электростанция снабжает током отдаленный поселок по длинному тонкому медному кабелю, сопротивление которого составляет 0,1 ом от электростанции до поселка и 0,1 ом от поселка обратно к электростанции. Поселок потребляет 50 а, которые расходуются на освещение и другие нужды.

а) Какой СИЛЫ ТОК *проходит по медному кабелю от электростанции до поселка?*

б) Какое НАПРЯЖЕНИЕ *необходимо, чтобы под действием его ток такой силы проходил через сопротивление 0,1 ом?*

в) Под действием какого НАПРЯЖЕНИЯ *ток идет по кабелю от поселка до электростанции?*

г) Если НАПРЯЖЕНИЕ *в поселке 100 в, то каково полное* напряжение, *вырабатываемое генератором на электростанции?*

д) Какую МОЩНОСТЬ *потребляет поселок?*

е) Какая МОЩНОСТЬ *теряется в обоих отрезках кабеля? (Чтобы найти* МОЩНОСТЬ, *умножьте* НАПРЯЖЕНИЕ *на* СИЛУ ТОКА, *но нужно* правильно взять напряжение для рассматриваемого участка цепи.)

Задача 30. Задача об электроснабжении фабрики: коэффициент полезного действия системы электроснабжения.

Для решения этой задачи перепечатайте на машинке приведенный ниже текст, оставляя пустые места, куда потом нужно будет вписывать ответы.

На фабрику по кабелю с общим сопротивлением 0,1 ом поступает 200 квт при напряжении на фабрике а) 100 в, б) 1000 в.
Вычислите для каждого случая:

1) СИЛУ ТОКА; *2)* НАПРЯЖЕНИЕ, *которое теряется на кабеле при прохождении по нему этого тока; 3)* МОЩНОСТЬ, *которая теряется в кабеле; 4)* КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ *системы электроснабжения (определяемый как отношение*

$$\left(\frac{\text{мощность, потребляемая фабрикой}}{\text{общая мощность, поступающая от электростанции}}\right).$$

Чтобы ответить на поставленные в задаче вопросы, дополните приведенные ниже утверждения.

Фабрика потребляет электроэнергию со скоростью 200 квт.

Это означает, что ______________________________

Вольтметр на фабрике показывает, что напряжение сети на фабрике 100 в. Это означает, что ______________________ *на фабрике* ______________________ .

Следовательно, сила тока, которую потребляет фабрика, в кулон/сек должна быть $\frac{?}{?}$, *или* ______________ *кулон/сек*

Этот ток течет от удаленной электростанции по питающему кабелю с общим сопротивлением (от станции и обратно) 0,1 ом.

Закон Ома утверждает, что для большинства проводников отношение НАПРЯЖЕНИЕ/СИЛА ТОКА *равно постоянной, называемой* СОПРОТИВЛЕНИЕМ.

Значит, в данном случае напряжение, необходимое, чтобы под действием него шел ток по питающему кабелю, должно быть ______________,

или ______________ *вольт. Это означает,*

что ____

в кабеле в виде тепла.

Но сила тока в кабеле равна ______________ *кулон/сек.*

Следовательно, мощность, теряемая в кабеле, равна (______________ ______________) (______________________________),

или ______________ *джоуль/сек, или* ______________ *киловатт.*

Следовательно, коэффициент полезного действия системы электроснабжения, или отношение:

$$\frac{\text{МОЩНОСТЬ, ПОТРЕБЛЯЕМАЯ ФАБРИКОЙ}}{\text{ОБЩАЯ МОЩНОСТЬ, ПОСТУПАЮЩАЯ ОТ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ}},$$

равен ______________, *или* ______________ %.

ПОВТОРИТЕ РАСЧЕТ ПРИ ТОМ ЖЕ ПОТРЕБЛЕНИИ МОЩНОСТИ ФАБРИКОЙ И ТОМ ЖЕ СОПРОТИВЛЕНИИ КАБЕЛЯ, НО ПРИ НАПРЯЖЕНИИ НА ФАБРИКЕ 1000 *в*.

ЗАПИСЫВАЙТЕ ОТВЕТЫ В КОЛОНКЕ СПРАВА.

Задача 31. Мощность

Утверждение «вольты, умноженные на амперы, дают ватты» представляет собой вульгарный, но удобный способ формулировки очень важного соотношения:

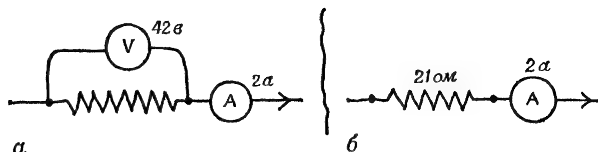
МОЩНОСТЬ *в ваттах* = (НАПРЯЖЕНИЕ *в вольтах*) · (СИЛА ТОКА *в амперах*).

Проведите рассуждение, показывающее, что это соотношение верно. (Рассмотрите любое устройство, между концами которого существует напряжение V в при силе тока через него I а. Объясните, что означают эти данные, и покажите, что МОЩНОСТЬ *должна быть равна V·I вт.)*

Задача 32. Мощность и энергия, отдаваемые в резисторе

(При решении этой задачи оставляйте ответы в виде произведения сомножителей.)

а) По проводнику течет ток силой 2 а, напряжение между концами проводника равно 42 в.



Фиг. 49. К задаче 32.

1) *Чему равна* мощность *(скорость выделения энергии) в ваттах?*
2) *Чему равна* мощность *в калориях в секунду?*
3) *Какое количество* энергии *в джоулях рассеивается проводником за 10 сек?*
4) *Какое количество* энергии *в калориях рассеивается проводником за 10 сек?*

б) По проводнику сопротивлением 21 ом течет ток силой 2 а.

1) *С помощью закона Ома найдите напряжение между концами проводника.*

2), 3), 4), 5) *Ответьте на вопросы 1) — 4), поставленные выше в а).*

в) Решите задачу б) для случая, когда по проводнику сопротивлением 21 ом течет вдвое больший ток, 4 а.

г) Сравните б) и в): как изменяются выделяемые в проводнике мощность *и* энергия, *если* сила тока *удваивается, а сопротивление остается неизменным?*

Задача 33. Закон Джоуля — Ленца для теплового действия тока

(Открытие этого закона относится к первому этапу изучения электрической цепи и представляет собой замечательное достижение.)

В проводнике, по которому течет ток силой I а при напряжении V в между концами проводника, выделяется энергия со скоростью VI вт, за t сек выделяется VIt дж. Во многих случаях мы знаем сопротивление проводника и текущий по нему ток, но не знаем непосредственно напряжения на проводнике. Поэтому нужно вычислить мощность или энергию, зная силу тока *и* сопротивление. *Предположим, у нас имеется отрезок провода сопротивлением R ом, по которому течет ток силой I а.*

а) Запишите закон Ома и выразите напряжение через R и I.

б) Подставьте результат, полученный в а), в выражение для мощности напряжение·сила тока *и дайте выражение для скорости выделения энергии в ваттах, используя R и I.*

в) Выразите результат, полученный в б), в калориях в секунду.

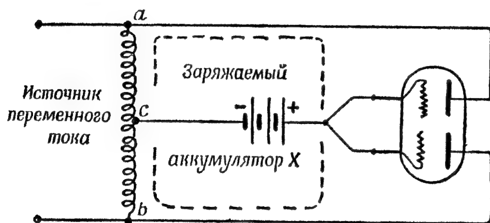
г) Дайте выражение для энергии, выделившейся за t секунд, 1) в джоулях, 2) в калориях.

Ответы на вопросы б), в) и г) представляют собой выражения закона Джоуля—Ленца (количества «джоулева тепла»). Это ответы задачи 32 в общей

форме. Рядовой инженер с этими формулами на короткой ноге, для техника они радость и гордость. Творчески мыслящие физики и инженеры тоже ценят их, но пользуются подобными формулами только тогда, когда понимают, как они получены. Ну, а что касается вас...

Задача 34. Двухполупериодный выпрямитель

На фиг. 50 показана пара диодов, с помощью которых можно получить «двухполупериодное выпрямление». Чтобы с помощью такой комбинации диодов зарядить аккумулятор X от сети переменного тока, мы можем воспользоваться схемой, представленной на фиг. 50 (хотя в действительности вместо делителя напряжения берут трансформатор). К делителю напряжения ab



Фиг. 50. Схема двухполупериодного выпрямителя, используемого для зарядки аккумулятора.

Примечание. Цепь накала диодов не показана.

прикладывается напряжение переменного тока с максимальным значением 200 в. Значит, когда напряжение между a и b равно 200 в, причем a положительно, напряжение между a и центральной точкой c равно 100 в и a положительно, а напряжение между b и c равно —100 в, причем b отрицательно. Четверть периода спустя напряжения эти равны нулю, а спустя еще четверть периода равны соответственно —100 и +100 в.

а) Что́ происходит внутри обеих половин лампы в каждой из следующих стадий периода:
   1) Когда напряжение ac равно +100 в, а напряжение bc равно —100 в.
   2) Четверть периода спустя, когда оба напряжения равны нулю.
   3) Еще четверть периода спустя, когда напряжение ac равно —100 в, а напряжение bc равно +100 в.

б) Начертите график временно́й зависимости (например, такой, как на экране осциллографа) для суммарного потока электронов через обе половины лампы (или через аккумулятор X).

в) Начертите график временно́й зависимости для потока электронов, который получится, если удалить один анод (т. е. если лампа представляет собой простой диод).

Задача 35. Экономика электроснабжения

Какие факторы следует учитывать при проектировании системы передачи электроэнергии с точки зрения наилучшего использования системы и снижения ее стоимости? Ответьте на этот вопрос, рассмотрев перечисленные ниже изменения в проекте системы, к которым может привести учет этих

факторов. В каждом случае 1) скажите, как повлияет производимое изменение в проекте на рассматриваемую величину: приведет к ее увеличению, уменьшению или не изменит ее сколько-нибудь значительно, и 2) дайте обоснование вашему ответу на вопрос 1).

а) *От электростанции до поселка и обратно проложен питающий кабель. Изменится ли при данном кабеле* коэффициент полезного действия при увеличении тока *(включении большего числа осветительных ламп)? Почему?*

б) *Изменится ли коэффициент полезного действия при повышении напряжения питания (скажем, со 100 в до 1000 в) и соответствующей замене ламп накаливания? Почему?*

в) *Повлияет ли переход к высокому напряжению на стоимость крепления кабеля на опорах* (ТОГО ЖЕ САМОГО КАБЕЛЯ) *и стоимость монтажа скрытой проводки? Почему?*

г) *Повлияет ли переход к высокому напряжению на условия безопасности работы на электростанции, на линии электропередачи, а также на безопасность потребителей электроэнергии? Почему?*

д) *Переход к высокому напряжению в поселке вызовет необходимость применения осветительных ламп с другой нитью накала. Какой должна быть новая нить накала по сравнению со старой: толще? Длиннее? Будет ли изготовление ламп, рассчитанных на значительно более высокое напряжение, гораздо сложнее или проще? Почему?*

е) *При протяженной линии электропередачи основная доля ее стоимости приходится на медный провод. Что вы могли бы порекомендовать для снижения стоимости линии? Какие другие изменения в линии электропередачи повлекла бы ваша рекомендация?*

ж) *Почему электроснабжение на переменном токе много удобнее, чем на постоянном?*

з) *Укажите на некоторые недостатки электроснабжения на переменном токе.*

Задача 36

ЗАДАЧИ О ПОТОКАХ ЭЛЕКТРОНОВ, *для решения которых достаточно иметь представление о содержании этой главы; см. задачи 1—4 в гл. 36.*

ГЛАВА 33 • ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ И ПОЛЯ: ЭЛЕКТРОСТАТИКА

...Закон Кулона. Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягивают друг друга с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними... *во всех* явлениях атомной и молекулярной физики, *во всех* твердых телах, жидкостях и газах и *во всех* явлениях, затрагивающих наши взаимоотношения с окружающим нас миром; единственная действующая сила, кроме тяготения,— это какое-либо проявление силы, описываемой этим простым законом. Силы трения, сила ветра, химические связи, вязкость, магнетизм, силы, заставляющие вертеться колеса фабрик и заводов,— все эти явления — не что иное, как закон Кулона...

Дж. Р. Захариас

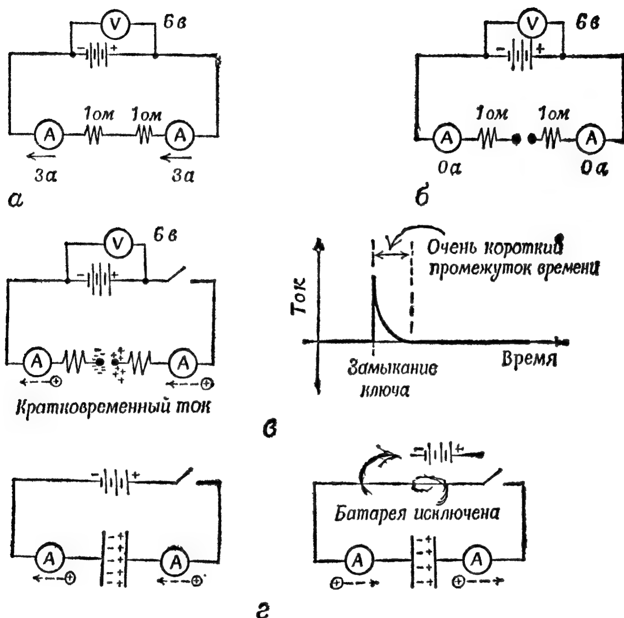
В журнале «Science», 8 марта 1957 г.

Изучению покоящегося электричества — «электростатике» — обычно отводится значительное место в курсе элементарной физики. Это дань застывшей традиции: ведь два столетия назад сведениями о покоящихся зарядах исчерпывались все знания об электричестве. Начинать изучение современных электрических цепей с электростатики — неправильный подход, и мы отказались от него. Кое-какие познания в электростатике вам, правда, понадобятся для изучения атомной физики. Насколько много вы увидите и узнаете из этой области физики, будет зависеть от аппаратуры, от погоды и от преподавателя. В общем, чем меньше, тем лучше.

Покоящиеся электрические заряды

Если электрическая цепь не замкнута, то ток по ней не течет. Но когда к незамкнутой цепи подключают батарею, по цепи протекают кратковременные токи, как показано на фиг. 51. Если оба провода в месте разрыва цепи заканчиваются большими пластинами из листового металла (образующими «конденсатор»), то кратковременные «зарядные токи» больше по величине, или протекают более продолжительное время. В течение доли секунды протекает несколько *«кулон/сек»*. Следовательно, сколько-то «ку-

лонов» должно пройти от батареи к пластинам и остаться там, прежде чем поток зарядов прекращается. Измерительные приборы показывают, что положительный ток течет *к* одной пластине и *от* другой пластины (или что *к* другой пластине течет отрицательный ток). Поэтому мы считаем, что, следовательно, на пластинах имеются заряды «+» на одной и «—» на другой, и говорим, что пластины «заряжены».



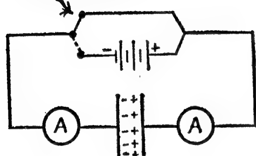
Фиг. 51. Кратковременные токи.

а — цепь замкнута, установившийся ток; *б* — цепь с разрывом, установившегося тока нет; *в* —цепь с разрывом; кратковременный «зарядный ток» при замыкании ключа, для обнаружения которого требуется весьма чувствительный прибор; *г* — цепь, в разрыв которой введены пластины; кратковременные «зарядный» и «разрядный» токи большей величины.

Если отсоединить батарею и включить вместо нее в цепь кусок проволоки, то потечет кратковременный ток в обратном направлении, пластины будут «разряжаться» через проволоку. Но пока это не сделано, заряды остаются на пластинах, отталкиваются бата-

рсей или удерживаются каким-то притяжением, действующим в промежутке между пластинами [1].

Можно показать, что пластины, будучи заряженными, действительно, притягивают друг друга. Сделайте пластины легкими и гибкими, например возьмите полоски тонкого листового металла и подведите к ним заряды от батареи. После того как пластины

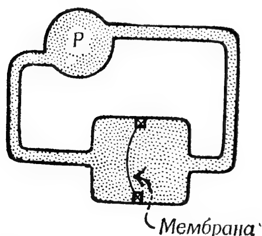


Фиг. 52. Двухполюсным переключателем батарею включают в цепь или отключают батарею и замыкают цепь без нее. Амперметры А и А показывают одинаковые кратковременные токи, текущие в одну пластину из другой. (Опыт 7 гл. 41.)

зарядятся, они притянутся друг к другу. Чем больше напряжение батареи (э. д. с), тем больше притяжение. Это можно использовать для построения простейшего вольтметра. Для этого следует взять одну пластину в виде тонкого листочка металла и подвесить ее внутри металлической коробки, играющей роль второй пластины. Когда между подвешенным листком и коробкой прикладывают напряжение, листочек отклоняется в направлении ближайшей стороны коробки. Угол отклонения указывает напряжение (в неравномерной шкале). Этот старинный прибор, которым пользуются еще и сейчас, носит название «электроскопа с золотыми листочками». Это идеальный вольтметр: он не потребляет тока

---

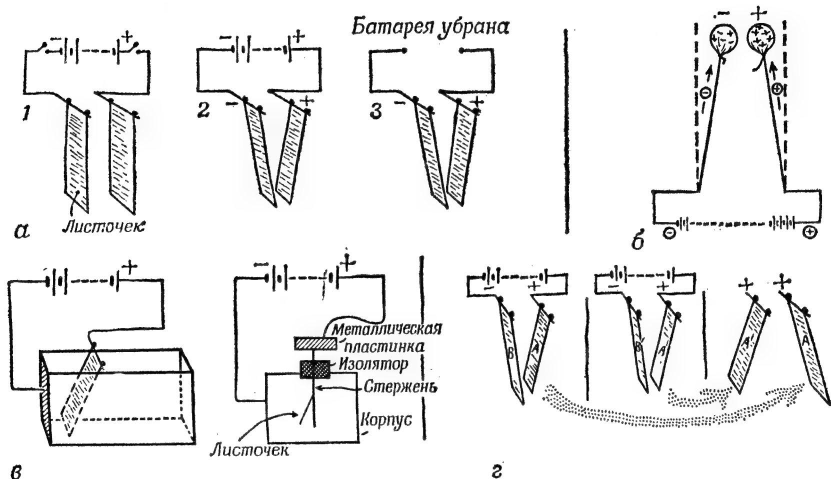
[1] Аналогом разрыва в электрической цепи (или конденсатора) в водяном контуре служит не заглушка в трубе, а эластичная мембрана из материала вроде листовой резины, перпендикулярная к оси трубы. В этом случае насос *P* может создать кратковременный ток, заставив мембрану прогнуться.



Фиг. 53. Аналог конденсатора в гидравлической цепи.

(если не считать тока в момент подключения), но он очень слабо реагирует на разность потенциалов, меньшую примерно 300 *в*.

Будучи однажды заряжены, металлические предметы остаются заряженными после отсоединения батареи, если они укреплены на изолирующих опорах, и к ним не прикасаются, скажем, металлической проволокой или влажными пальцами. Подсоедините две гибкие пластины A и B (или два воздушных шарика с металлическим покрытием на проводящих нитях) к зажимам «+» и «—» батареи: они притягиваются друг к другу. Укрепите теперь



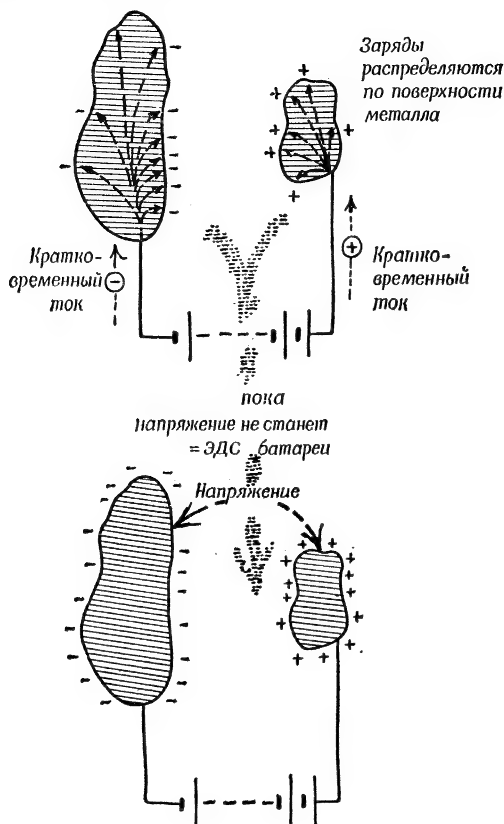
Фиг. 54. Электроскоп.

пластины A и B, заряженные «+» и «—», на изоляторах и зарядите еще одну пару пластин, A' и B', тоже соответственно «+» и «—». Поднесите A' к A: они отталкиваются (см. фиг. 54, *г*); B и B' тоже отталкиваются, тогда как A и B притягиваются. Вот почему нам нужны обозначения «+» и «—».

Две пластины, присоединенные к батарее, обладают противоположными зарядами и притягиваются; эти заряды исчезают («нейтрализуются»), если убрать батарею и соединить пластины куском проволоки.

Гибкие пластины или воздушные шарики не обладают никакими особыми электрическими свойствами — они были выбраны затем, чтобы малые электрические силы уравновешивались малыми силами тяжести. Так ведут себя любые металлические

предметы (если только они укреплены на изоляторах, чтобы предотвратить появление токов, уносящих заряды). По проводникам (металл, графит и т. д.) заряды легко перемещаются. Вот почему можно до предела зарядить металлический предмет одним каса-

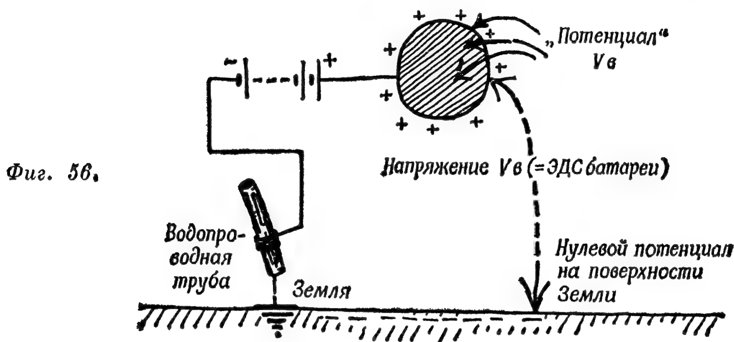


Фиг. 55. Движение зарядов.

нием провода от батареи. На изоляторах тоже могут собираться заряды, но лишь в том месте, где провод касается изолятора.

Батарея, присоединенная к двум изолированным металлическим предметам, быстро отталкивает к ним заряды до тех пор, пока разность потенциалов между предметами не станет равной э. д. с. батареи.

Иногда нам кажется, что мы сообщаем заряд одному отдельно взятому предмету, и у нас возникает недоумение, куда девался заряд противоположного знака. Обычно можно убедиться в том, что он находится на окружающих телах: на коробке электроскопа, на стенах комнаты, на самой земле. Мы можем по небрежности оставить другой провод от батареи на влажном столе или полу, и по нему заряд противоположного знака, отталкиваемый батареей, будет отводиться «на землю». Или, напротив, намеренно присоединяем другой провод к водопроводной трубе, которая



Фиг. 56.

имеет соединение с землей. Если один зажим батареи «заземлен», то можно незаземленным проводом заряжать предметы. В этом случае говорят о *потенциале* заряженного тела, подразумевая разность потенциалов между этим телом и землей [1].

Но есть еще один замечательный способ заряжать тела, который годится для всех материалов. Он известен в течение столетий как способ, неразрывно связанный с учением об электростатике, о покоящемся электричестве. Подойдем теперь к нашей теме по-новому и рассмотрим простые явления, относящиеся к этому способу. Забудьте на мгновение то, что вы знаете о токах и зарядах, и проследите, как накапливались знания в далеком прошлом.

Новый подход к изучению электростатики: заряжение тел «трением»

Потрите стержень из пластика, эбонита или сухого стекла куском ткани или меха: он будет притягивать пыль и маленькие

[1] В некоторых случаях, например при изучении строения атома, мы относим нуль потенциала от «земли» в бесконечность.

кусочки бумаги. Два одинаковых натертых стержня отталкивают друг друга. Мы говорим, что они *заряжены*. На данном этапе «заряд» — это лишь наименование свойств «притягивать кусочки бумаги» и «отталкивать такие же тела» [1]. Мы представляем себе, что на поверхности стержней что-то скапливается, нечто такое, что мы называем электричеством, и это воображаемое скопление электричества именуется нами *зарядом электричества*, *электрическим зарядом* или просто *зарядом*. Можно показать, сняв поверхностный слой стержня, что заряд, который мы определяем таким образом, остается на поверхности стержня.

Проводники и изоляторы

Куском провода можно отвести заряды с поверхности заряженного тела, то же самое можно сделать, коснувшись поверхности пальцами или влажной нитью. Но с помощью *изоляторов*, например стекла или плексигласа, этого сделать нельзя. Возьмем образцы из различных материалов и прикрепим их к изолирующим ручкам так, чтобы любые заряды, приобретаемые образцами, не могли с них уходить. Мы обнаруживаем, что *любые два разнородных материала, касаясь друг друга, становятся заряженными* — металлы, неметаллы, элементы, соединения.

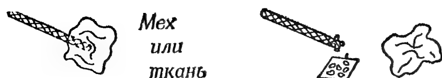
Силы взаимодействия между зарядами

Вскоре мы убеждаемся в том, что есть два рода зарядов; мы будем обозначать их через «+» и «—». Заряженные стержни из плексигласа или эбонита отталкивают друг друга, заряженные стержни из стекла (потертые о шелк) также отталкивают друг друга. Но заряженный плексиглас притягивает заряженное стекло. Если потереть стержень из плексигласа о мех, то оба тела — стержень и мех — становятся заряженными и притягивают друг друга. Мы называем *отрицательными* заряды, появляющиеся на эбоните, плексигласе, сере, и *положительными* — заряды на стекле и мехе, которым потерли плексиглас[2]. Силы взаимодействия между заряженными телами таковы: «+» и «+» отталки-

---

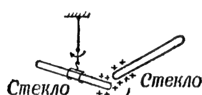
[1] Мы пользуемся этим словом, чтобы охарактеризовать определенную ситуацию, но даем ей лишь название, а не объяснение. В прежние века, говоря о заряженных телах, вероятно, сказали бы, что они «заколдованы».

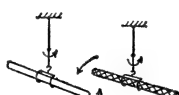
[2] Бенджамин Франклин выбрал названия «положительный» и «отрицательный» задолго до того, как появление батарей позволило получить сведения об электрических токах.

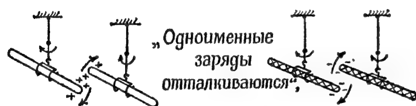


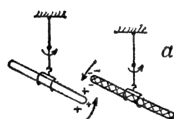










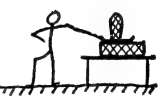


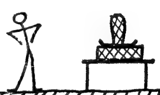
Фиг. 57. Электрические заряды.













Фиг. 58.

ваются, «—» и «—» отталкиваются, «+» притягивает «—» и «—» притягивает «+». Это можно выразить старой формулой:

ОДНОИМЕННЫЕ ЗАРЯДЫ ОТТАЛКИВАЮТСЯ, РАЗНОИМЕННЫЕ ЗАРЯДЫ ПРИТЯГИВАЮТСЯ.

Умножение зарядов: электрофор

Заряд большой величины легко получить с помощью *электрофора* — диска из плексигласа (или эбонита), заряжаемого трением о мех. Диск располагается на столе, заряжается его верхняя поверхность. Возьмите металлическую пластинку с изолирующей ручкой и зарядите ее следующим образом:

1) Поднесите металлическую пластинку на очень близкое расстояние к заряженному диску. (Не беда, если она коснется диска, поскольку диск — изолятор.)
2) Коснитесь одним пальцем металлической пластинки, присоединив ее (через руку, тело, подошвы обуви) на мгновение к земле. Затем уберите палец.
3) Снимите пластинку с диска. Пластинка теперь заряжена и легко может отдать часть заряда другим телам при соприкосновении с ними.

Сейчас нам кажется это бессмысленным занятием, чем-то вроде колдовского ритуала. Мы воспользуемся этим процессом для получения зарядов и объясним его позже, хотя вы могли бы отгадать объяснение, используя то, что уже знаете.

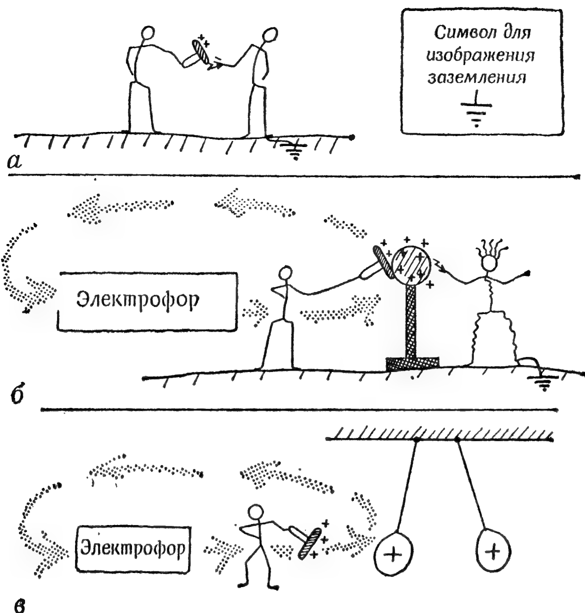
Заряд на диске остается неизменным, поэтому процесс можно повторить и получить бесконечный поток зарядов, поступающих на пластинку. Как вы думаете, откуда берется энергия?

Опыты с заряженной пластинкой, электроскопом и пробным шариком

Если заряженную пластинку электрофора поднести на близкое расстояние к чьему-нибудь вытянутому пальцу или к носу, то возникает искра, и пластинка теряет свой заряд. Человек, к которому поднесли пластинку, испытывает легкий электрический удар, но не остается заряженным, если он не стоит на изолирующей подставке. Пластинку можно заряжать повторно и сообщать с помощью нее заряд какому-нибудь металлическому предмету, пока он почти не перестанет воспринимать заряд при дальнейших прикосновениях [1]. При прикосновении к такому заряженному предмету можно вызвать большую искру и ощутить электрический удар. Если к этому предмету прикоснуться другим изолированным металлическим предметом или соединить оба тела влажной нитью, или металлической проволокой, то часть заряда первого тела перейдет ко второму. При распределении заряда между нашим металлическим предметом и землей предмет, по-видимому, те-

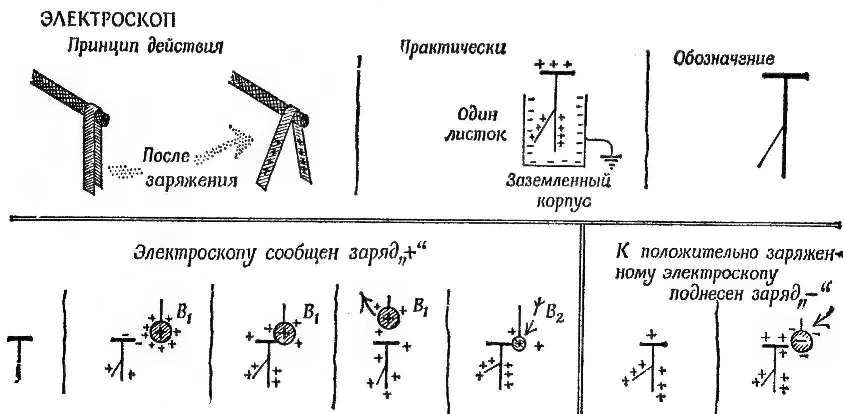
---

[1] Если говорить о напряжении, то пластинка заряжается до определенного напряжения (разности потенциалов между пластинкой и землей). Потенциал заряжаемого предмета повышается, приближаясь к потенциалу пластинки, и на него переходит все меньшая и меньшая доля заряда пластинки.

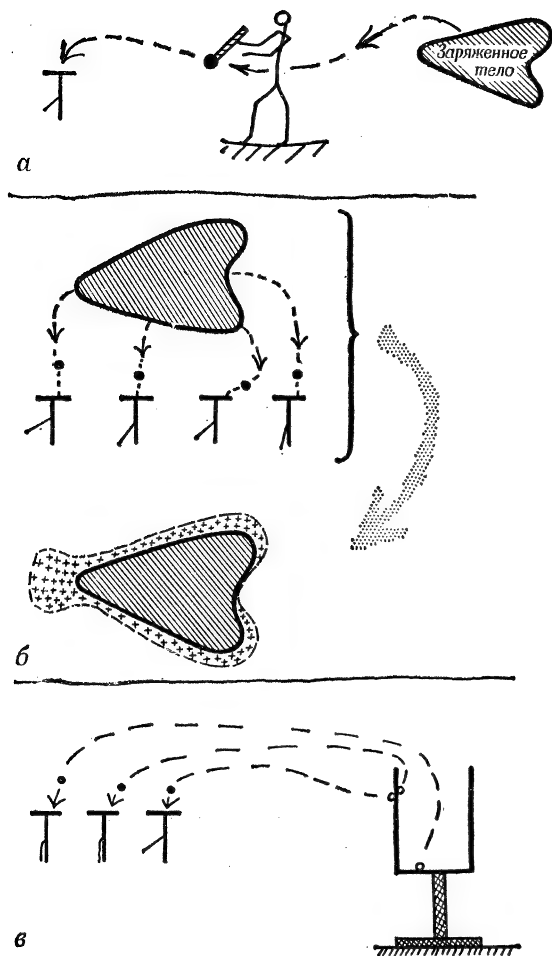


Фиг. 59. Электрические заряды.

а и *б* — удар током; *в* — между воздушными шариками, заряженными посредством многократного применения электрофора, наблюдается отталкивание. Воздушные шарики должны иметь проводящую поверхность, для этого их покрывают тонким слоем металла или графита.



Фиг. 60. Электроскоп.



Фиг. 61. Распределение заряда.

а — исследование распределения заряда на проводнике; *б* — область со знаками «+» изображает поверхностную плотность заряда; *в* — распределение заряда на наружной и внутренней поверхностях заряженного полого металлического стакана.

ряет весь заряд: если распределение происходит в пропорции к размерам, то на нем, действительно, останется немного.

Воздушным шарикам с металлическим покрытием, подвешенным на шелковых нитях, можно сообщить большие заряды и наблюдать отталкивание между ними. Можно изготовить электроскоп[1] «с золо-

[1] «Скоп» — от греческого слова — «смотрю». Название означает «прибор для наблюдения эффектов, связанных с электрическим зарядом».

тыми листочками», подвесив на изоляторе одну или две полоски из тонкого листового металла. Это чувствительный прибор, служащий для обнаружения электрических зарядов. Он измеряет силу, действующую на листочек из-за наличия на нем заряда, благодаря уравновешиванию этой силы *определенной долей* силы тяжести. Электроскоп обычной конструкции состоит из металлического стержня, к которому привешен тонкий листочек. Стержень укреплен при помощи изолирующей пробки в верхней части металлического корпуса. Стержень заканчивается вверху за пределами корпуса шаром или пластинкой, через которые легко сообщить заряд листочку. Даже если просто поднести заряд на близкое расстояние, листочек отклоняется и остается в таком положении, пока заряд остается поблизости [1].

Чтобы перенести *пробные* заряды с какого-либо большого заряженного тела к листочку электроскопа, мы пользуемся маленьким пробным шариком. Каждая новая порция заряда увеличивает отклонение листочка. Если сообщить листочку некоторое количество положительного заряда, а потом подвести к нему небольшую порцию отрицательного заряда, то листочек слегка опустится. Это дает основание полагать, что новый заряд нейтрализовал какую-то долю прежнего. Таким образом, обозначения «+» и «—» оказываются вполне подходящими. Это дает в наше распоряжение простой способ обнаружения положительных и отрицательных зарядов.

С помощью пробного шарика и электроскопа можно исследовать распределение «плотности заряда», на поверхности какого-либо заряженного тела. Мы убеждаемся в том, что заряд распределяется неравномерно. Наибольшую величину поверхностная плотность заряда имеет на остриях, наименьшую — на вогнутостях. Продолжая эти наблюдения, зарядим полый металлический цилиндр и исследуем его. Оказывается, на внешней поверхности может быть распределено большое количество заряда, а на внутренней поверхности *заряд отсутствует*.

Задача 1

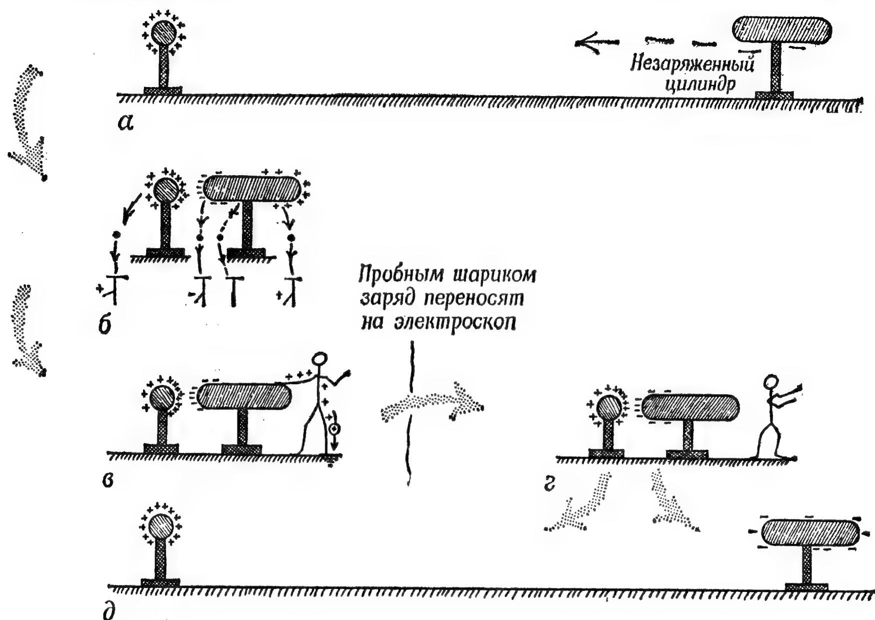
На изолирующую подставку помещен незаряженный металлический стакан. Внутрь стакана на шелковой нити опускают заряженный металлический шар, касаются шаром стакана изнутри *и извлекают шар.*
а) Какое количество заряда останется на шаре?
б) Какое количество заряда останется на шаре, если он касается стакана снаружи, а не изнутри?

---

[1] Электрическая сила обусловлена отталкиванием со стороны зарядов, находящихся на стержне, к которому крепится листочек, и притяжением зарядов противоположного знака, находящихся на стенках корпуса электроскопа. Если соединить листочек с каким-либо большим заряженным телом, то листочек воспринимает лишь малую долю всего заряда; воспринимаемый листочком заряд является мерой напряжения объединенного объекта (тело + листочек). Таким образом, отклонение листочка указывает разность потенциалов между объектом (тело + листочек) и окружающими стенками, или землей.

Электростатическая индукция

Простое *приближение* заряда к электроскопу вызывает известный эффект. Исследуем этот эффект (его называют «наведением» или «индуцированием» зарядов, или «электростатической индукцией»). Зарядим большой металлический шар и поместим его вблизи от длинного металлического цилиндра с закругленными торцами. Возьмем маленький пробный шарик и электроскоп и посмотрим, какие заряды имеются на цилиндре. Предположим, что большой шар заряжен положительно. В этом случае мы обнаружим на ближнем конце



Фиг. 62. Стадии процесса электризации через влияние.

цилиндра отрицательный заряд, у середины заряд отсутствует или его мало, а дальний конец цилиндра будет заряжен положительно. Мы считаем, что эти положительные и отрицательные заряды с самого начала имелись в незаряженном цилиндре и что произошло их разделение под влиянием заряда большого шара. Заряды свободно перемещаются по цилиндру, поэтому положительный заряд большого шара притягивает отрицательные заряды и отталкивает от себя положительные. Соедините теперь цилиндр с землей, коснувшись его пальцем. Уберите палец и снова посмотрите, как заряжен цилиндр. На цилиндре по-прежнему будет отрицательный заряд у конца, ближайшего к шару; положительных зарядов на удаленном конце цилиндра нет. Мы говорим, что они ушли через наш палец дальше, «на землю». (Путь зарядов: рука — тело — ноги — сырая обувь — сырой пол и т. д.). Как вы знаете,

это движение зарядов можно продемонстрировать с помощью микроамперметра. Теперь уберите большой шар, на котором по-прежнему имеется положительный заряд. На цилиндре останется отрицательный заряд, плотность его на концах будет очень велика. Мы «создали» отрицательный заряд на цилиндре (без потери первоначального положительного заряда на большом шаре). Этот отрицательный заряд можно снять и как-то использовать. Описанный процесс можно повторить сколько угодно раз, получая порции отрицательных зарядов, которые могут быть посланы по проволоке в виде тока малой величины. Обратите внимание на последовательность наших действий после того, как мы зарядили большой шар: 1) приближаем к шару металлический цилиндр, 2) касаемся на мгновенье цилиндра пальцем, 3) убираем цилиндр и убеждаемся в наличии на нем заряда, который можно использовать. Этот процесс называют *электризацией через влияние*, а само явление — *электростатической индукцией*. Подумайте, где вы встречались с ним раньше? Откуда берется энергия, получаемая вместе с зарядом цилиндра?

Задача 2

а) *На стеклянном стержне имеется небольшой положительный заряд, полученный трением. Можно зарядить электроскоп, если «соскрести» некоторое количество заряда со стержня и перенести его на электроскоп. Как зарядится электроскоп: положительно или отрицательно?*

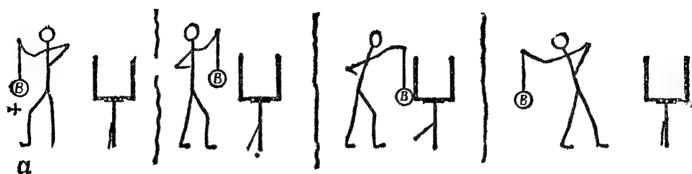
б) *Вы можете также создать заряд на электроскопе, поднеся к нему заряженный положительно стержень. Что вы должны будете затем сделать, чтобы часть заряда осталась постоянно на электроскопе, не приближая дальше стержень? Какой это будет заряд: «+» или «—»?*

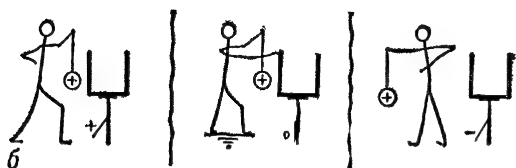
Теперь вы можете зарядить электроскоп положительно или отрицательно с помощью положительно заряженного стеклянного стержня. Попытайтесь сообщить дополнительный положительный и отрицательный заряд уже заряженному электроскопу.

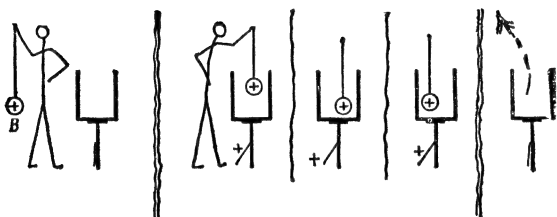
Полые проводники (фиг. 63—65)

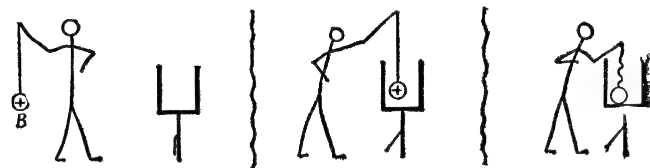
Поставьте небольшой металлический стакан сверху на электроскоп, так чтобы листочек мог воспринимать пробную порцию заряда стакана. Зарядите металлический шар B, держа его на изолирующей нити, и поднесите его на близкое расстояние к стакану снаружи. Чем ближе шар B поднесен к стакану, тем больше отклонение листочка — тем больше положительный заряд, отталкиваемый к электроскопу положительным зарядом шара B. Если *вы* коснетесь пальцем стакана или электроскопа, то листочек опускается до нуля. Но если вы после прикосновения уберете палец, а затем уберете шар, то на стакане и электроскопе останется отрицательный заряд — результат электризации через влияние. До этого, когда электроскоп показывал нуль, на стакане был отрицательный заряд, но он притягивался положительным зарядом шара, и к листочку никакого заряда не попадало. Такие заряды образно называют «связанными зарядами».

Начнем теперь опыт снова, когда стакан и электроскоп не заряжены, и опустим положительно заряженный шар внутрь стакана. Электроскоп показывает большой заряд, который остается неизменным, *куда бы ни поместить шар B внутри стакана*. Если B вынуть, то листочек опускается, если ввести


B
+
B
B
B
а


+
+
+
0
+
−
б


+
B
+
+
+
+
+
+
Наклон листочка не меняется
в


+
B
+
г


На B
не остается
заряда
Отдельная
проверка
электроскопа
д

Фиг. 63, а—д.

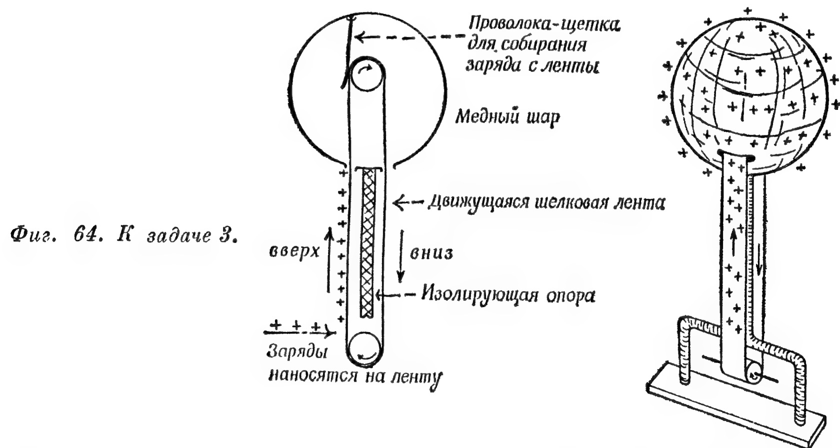
снова, то восстанавливается прежнее отклонение листочка. Теперь коснитесь шаром B стакана: отклонение листочка остается тем же. Выньте шар B: сохраняется полное отклонение листочка. По-видимому, шар B отдал весь свой заряд. (Куда же *мог уйти* весь заряд шара B, приведенного в соприкосновение с внутренней поверхностью стакана?) Детально «объяснить» это можно так. Мы говорим, что когда B находится внутри стакана, его положительный заряд удерживает равный по величине заряд противоположного знака на внутренней поверхности стакана (в виде «связанного заряда») и отталкивает такой же по величине положительный заряд к наружной поверхности первоначально нейтрального стакана и к электроскопу. Когда B касается внутренней поверхности стакана, оба заряда, находящиеся внутри стакана, получают возможность нейтрализовать друг друга. Шар B теряет весь свой заряд, но такой же заряд остается на внешней поверхности стакана.

Это свойство полого цилиндра [1] находит различные применения. Два случая применения этого свойства рассмотрены в задачах 3 и 5.

Наблюдая электрические эффекты внутри заряженного металлического шара, мы можем даже проверить закон, который устанавливает характер силы взаимодействия между зарядами. Об этом говорится дальше.

Задача 3 (фиг. 64)

В генераторе Ван-де-Граафа на миллион вольт, который применяется в опытах по «расщеплению атомов», на огромном медном шаре накапливаются электрические заряды. Происходит это следующим образом. Внутрь медного



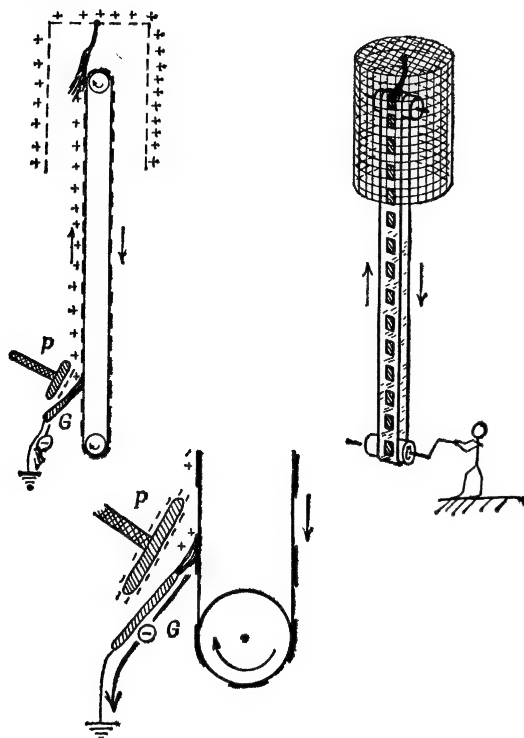
Фиг. 64. К задаче 3.

шара одним своим концом заходит бесконечная шелковая лента, которая движется на двух роликах. Вне шара лента заряжается (например, с помощью простейшего устройства типа электрофора, описанного выше), а внутри шара лента касается проволоки-щетки. Почему заряды переходят с ленты на шар?

[1] Его называют цилиндром (ведерком) Фарадея; Фарадей столетие тому назад использовал в своих опытах ведерко для охлаждения вина.

Генератор Ван-де-Граафа

Электрофор, наше простейшее устройство, рассмотренное выше, можно усовершенствовать и превратить в так называемую электрическую индукционную (или электростатическую) машину, приводимую в действие вращением. Электрической индукционной машиной широко пользовались в прошлом для



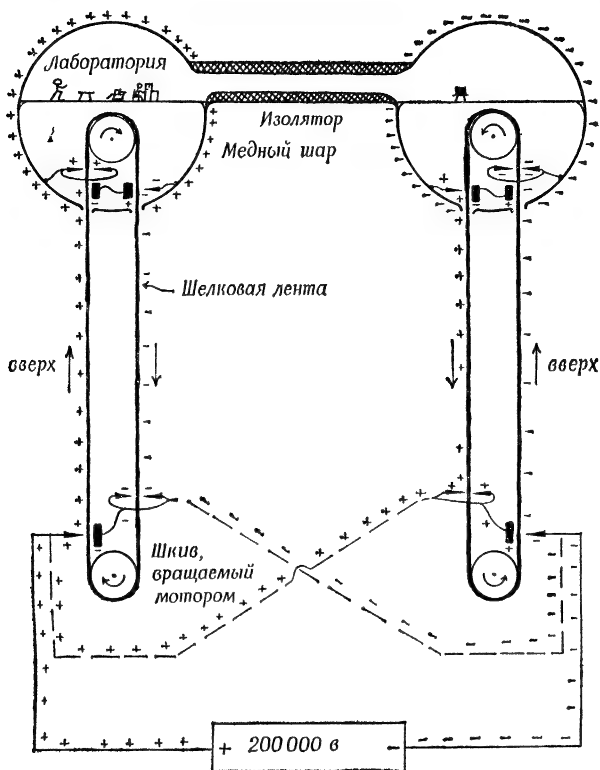
Фиг. 65. Модель генератора Ван-де-Граафа.

исследовательских работ и в учебных целях. Теперь эта машина — анахронизм, но ею все еще пользуются для демонстрационных опытов.

Более современную машину представляет собой генератор Ван-де-Граафа, изготовленный впервые Робертом Ван-де-Граафом в Принстоне. Такими машинами пользуются теперь в атомных исследованиях для получения разности потенциалов в несколько миллионов вольт и ускорения заряженных частиц.

На фиг. 65 показана уменьшенная модель генератора Ван-де-Граафа. Бесконечная шелковая лента, приводимая в движение от руки, переносит заряды в клетку. К ленте приклеены металлические пластинки. У нижнего конца ленты с помощью устройства, которое производит электризацию через

влияние, каждой металлической пластинке сообщается небольшой положительный заряд. Поскольку шелк — хороший изолятор, заряды эти никуда не уходят, и лента переносит их в клетку. Внутри клетки упругая проволока,



Фиг. 66. Сдвоенный генератор Ван-де-Граафа.

От источника с напряжением 200 000 *в* наносят положительные заряды на одну ленту, а отрицательные — на другую. Внутри огромной сферы с помощью остроумной схемы электризации через влияния (показана в упрощенной форме) заряды противоположного знака наносятся на нисходящую часть ленты, что облегчает работу источника.

В очень крупных генераторах, дающих малый постоянный ток при разности потенциалов несколько миллионов вольт, важное значение имеют проблемы изоляции, и может даже потребоваться поместить генератор в атмосферу сжатого газа.

которая касается ленты, собирает имеющийся на пластинках заряд. Большой металлический листочек, привешенный снаружи клетки, показывает, как накапливается заряд.

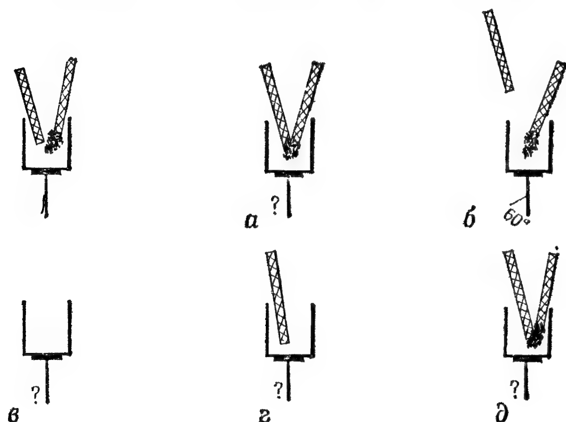
Задача 4

Объясните кратко, как положительные заряды переносятся на металлические пластинки на фиг. 65. Обратите внимание на то, что P представляет собой металлическую пластинку, которая укреплена на изоляторе вблизи ленты и несет отрицательный заряд; G — металлическая щетка, соединенная с землей, которая касается металлических пластинок вблизи P.

В большой машине роль клетки играет огромный медный шар, иногда настолько больших размеров, что в нем могла бы разместиться настоящая лаборатория [1]. На шелковой ленте нет металлических пластинок, заряды остаются на самом шелке. Заряды наносятся на шелк внизу и снимаются вверху с помощью ряда острий, которые расположены на близком расстоянии от ленты, но не касаются ее [2].

Задача 5. Определение одинаковых и противоположных по знаку зарядов (фиг. 67)

К электроскопу прикреплен небольшой металлический стакан. В стакан вводят маленький кусочек плексигласа и маленький кусочек меха на изолирующих рукоятках. И плексиглас, и мех не заряжены. Если заряды, получаемые



Фиг. 67. К задаче 5.

трением, равны и противоположны по знаку, то что, по вашему мнению, произойдет с электроскопом на каждой из следующих *стадий опыта*, если задано, что в стадии б) листочек отклоняется на 60°:

а) Мех и плексиглас потерты друг о друга внутри стакана (они не касаются *стенок стакана).*

б) Плексиглас извлекается из стакана (листочек отклоняется на 60°).

---

[1] Оказывается, в такой лаборатории нельзя находиться экспериментаторам: она полностью экранирована от любого электрического поля, но не защищена от рентгеновского излучения.

[2] Специфическое действие острий рассматривается ниже.

в) Мех также извлекается из стакана, не касаясь его.
г) Плексиглас снова вводится в стакан.
д) В стакан вводятся снова и плексиглас, и мех.

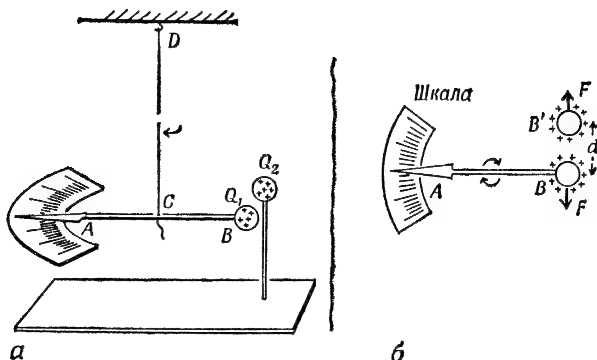
Сохранение заряда

Предметы, окружающие нас в повседневной жизни, кажутся незаряженными: между ними нельзя заметить притяжения или отталкивания; молекулы газа не обнаруживают тенденции перемещаться в каком-либо одном направлении в однородном электрическом поле. Если незаряженное вещество содержит положительные и отрицательные заряды, которые можно разделять или переносить, то они должны содержаться в равных количествах. Когда мы заряжаем предметы трением или с помощью батареи, то рассчитываем обнаружить равные количества противоположных по знаку зарядов. Опыт, о котором идет речь в задаче 5, дает возможность произвести очень тонкую и вместе с тем важную проверку. Из этого опыта и опытов по наблюдению кулоновской силы взаимодействия зарядов можно заключить, что *электрический заряд сохраняется:* происходит обмен зарядами между телами без выигрыша или потери заряда, «создавать» можно только равные количества противоположных по знаку зарядов. Мы считаем, что этот фундаментальный принцип сохраняет силу и в атомной и ядерной физике. Оказывается даже, что фотон излучения высокой энергии (который, конечно, не представляет собой ни вещества, ни электричества) превращается в пару электрон — позитрон с одинаковыми по величине и противоположными по знаку зарядами. Мы говорим о «зарядовом обмене» между некоторыми составными частями ядра — процесс этот происходит слишком быстро, чтобы его можно было описать языком механики,— и по-прежнему считаем закон сохранения заряда незыблемым.

Силы, с которыми заряды действуют друг на друга: закон Кулона

Электричество и *заряды* — это такие термины, которые употребляют в тех случаях, когда наблюдается отталкивание и притяжение. Силы отталкивания и притяжения словно исходят от заряженных тел в радиальных направлениях. Сила отталкивания или притяжения, с которой один заряд действует на другой, направлена вдоль прямой, соединяющей оба заряда, и уменьшается с увеличением расстояния между ними. Спустя столетие после того, как Ньютон открыл закон всемирного тяготения, французский физик Кулон исследовал экспериментальным путем силу взаимодействия между зарядами и показал, что она так же, как и сила тяготения, изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния. Схема прибора Кулона показана на фиг. 68. Он по существу не отличается от прибора, который Кавендиш примерно в это же время использовал для измерения гравитационной постоянной G. На изолирующем стержне AB, подвешенном

на тонкой нити CD, укреплен металлический шарик B, которому сообщен заряд. К шарику B приближают другой шарик B' и по мере приближения измеряют силу отталкивания по углу закручивания нити. Предполагая, что при закручивании нити справедлив закон Гука, Кулон сравнил силы взаимодействия при различных расстояниях d между B и B'. Он установил, что F изменяется пропорционально $1/d^2$. Кулон изменял заряд Q одного шарика,



Фиг. 68. Крутильные весы Кулона.

а — вид сбоку; *б* — вид сверху.

Сила оценивалась по углу закручивания нити. Заряженные шары тщательно изолировались. Весь прибор был закрыт, чтобы уменьшить влияние токов утечки через воздух.

а затем другого до $^1/_2\ Q$, $^1/_4 Q$ и т. д., измеряя в каждом случае силу взаимодействия, и установил (или, вернее, предположил и не обнаружил противоречий с этим предположением), что F *изменяется пропорционально заряду шарика* B (Q_1) и *заряду шарика* B' (Q_2). Объединяя эти выводы, Кулон установил, что

$$F \sim \frac{Q_1 \cdot Q_2}{d^2}, \quad \text{или} \quad F = \mathcal{B}\frac{Q_1 \cdot Q_2}{d^2}.$$

Это закон Кулона. $\mathcal{B}$ — универсальная постоянная, которая играет такую же роль, что и гравитационная постоянная G.

Задача 6

Кулон не располагал средствами для измерения зарядов Q_1 или Q_2. Тем не менее Кулон имел возможность при желании изменять заряд шарика Q

до $\frac{1}{2}$ Q и таким образом исследовать роль каждого из зарядов Q в выражении для силы взаимодействия.

а) Каким образом Кулону удавалось уменьшить заряд Q до $\frac{1}{2}$ Q? (Указание. Он располагал дополнительным металлическим шариком такого же размера.)

б) Какое предположение относительно природы заряда нужно сделать, прибегая к приему, используемому для решения задачи а)? (Фактически это предположение было сформулировано почти как аксиома при введении понятия электрического заряда. Сегодня мы можем в известной степени подтвердить его экспериментально путем счета электронов и наблюдая пары электрон — позитрон.)

Значение $\mathcal{B}$ зависит от выбора единиц измерения заряда точно так же, как значение постоянной G зависит от того, измеряем ли мы массу в килограммах или в фунтах. Мы будем пользоваться кулонами, с которыми вы уже встречались, когда шла речь о движении зарядов, а также метрами и ньютонами [1].

В этом случае значение $\mathcal{B}$ определяется экспериментально близким к 9 000 000 000, т. е. $9{,}0 \cdot 10^9$ *ньютон·м²/кулон²*.

В нашем курсе не обязательно знать значение $\mathcal{B}$, однако, имея в виду проследить связь между законом Кулона и электрическими токами, интересно измерить это огромное число. Чтобы измерить $\mathcal{B}$, нам понадобятся сведения об электрических полях. Мы еще вернемся к этому вопросу.

Проверка закона Кулона

ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ОПЫТ

Можно приближенно произвести непосредственную проверку закона Кулона, измерив силу взаимодействия между двумя зарядами. Мы сообщаем большой заряд двум металлическим шарикам [2] и «взвеши-

[1] Один способ выбора единиц, которым широко пользовались в электростатике в прошлом столетии, а иногда пользуются и в наше время, заключается в следующем. Требуют, чтобы постоянная $\mathcal{B}$ равнялась просто 1,000, выбирая величину единицы измерения Q так, чтобы это условие выполнялось. Однако единица измерения оказывается при этом чрезвычайно малой и неудобной для использования при рассмотрении явлений, связанных с протеканием тока. Выбором единицы можно упростить вычисления при изучении одной области явлений, но тогда возникают трудности в какой-то другой области. Подобный выбор единиц никак не затрагивает физических основ рассматриваемых явлений.

[2] Заряды, находящиеся на одном шарике, отталкивают заряды на другом шарике, заставляя их переходить по металлической поверхности и смещаться к противоположной стороне второго шарика. Строго говоря, следовало бы брать расстояние не между центрами шариков, а несколько большее расстояние. Результаты опыта ухудшаются, кроме того, из-за утечки зарядов, которая имеет место всегда, исключая очень сухую погоду.

ваем» один шарик, когда второй удален от него на 0,1, 0,2, 0,3 *м* и т. д., считая расстояние между центрами.

Вам следовало бы посмотреть, как проделывается описываемый опыт, пусть это будут лишь грубые измерения, чтобы воочию убедиться в справедливости этого замечательного экспериментального закона. В задаче 7 приведен пример записи результатов измерений, позволяющий получить представление об этом опыте в том случае, если вам не удастся его посмотреть.

Задача 7. Проверка закона Кулона (фиг. 69)

Шарик A прикреплен к одному концу плексигласового коромысла. Слабая (но хорошая) стальная пружина уравновешивает вес шарика и позволяет измерить любую дополнительно действующую на шарик силу. У второго конца коромысла укреплена длинная стрелка, против которой расположена вертикальная шкала. Шарик B крепится отдельно на подвижном изолирующем стержне над шариком A. От стержня, на котором крепится шарик B, вниз отходит стержень из плексигласа с делениями, позволяющий измерить расстояние между шариками. Каждый шарик был заряжен с помощью электрофора. Шарик B относили на большое расстояние и устанавливали стрелку, связанную с шариком A, против нуля шкалы. Затем шарик B располагали над A на определенном расстоянии по вертикали и отсчитывали показание стрелки, по которому можно оценить силу отталкивания. (Шкала разбита на произвольные деления, каждое примерно по 1 см. Чтобы оценить жесткость пружины — нам она здесь не нужна, — на шарик A помещали груз 1 г; при этом отсчет по шкале равен 49.) Ниже в таблице приведена для примера запись результатов измерений («бесконечность» означает, что шарик B убран).

Расстояние между центрами шариков *(метры)*	Отсчет по шкале *(число делений)*
«Бесконечность»	*0*
0,10	*26*
0,20	*7*
0,30	*3*
0,40	*? 2*

а) Перепишите таблицу, добавив столбец ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЗАКОНА КУЛОНА. *Проделайте вычисления с целью проверить обратную пропорциональность квадрату расстояния.*

б) Предполагая, *что значение $\mathscr{B}$ (которое мы измерим позже) равно $9{,}0 \cdot 10^9$, и считая оба заряда равными, оцените их величину в кулонах. (Обратите внимание на то, что сила должна быть выражена в ньютонах.)*



Плексиглас

B

Шкала

Плексиглас

A

80 60 40 20 0

а

49

1 грамм

0

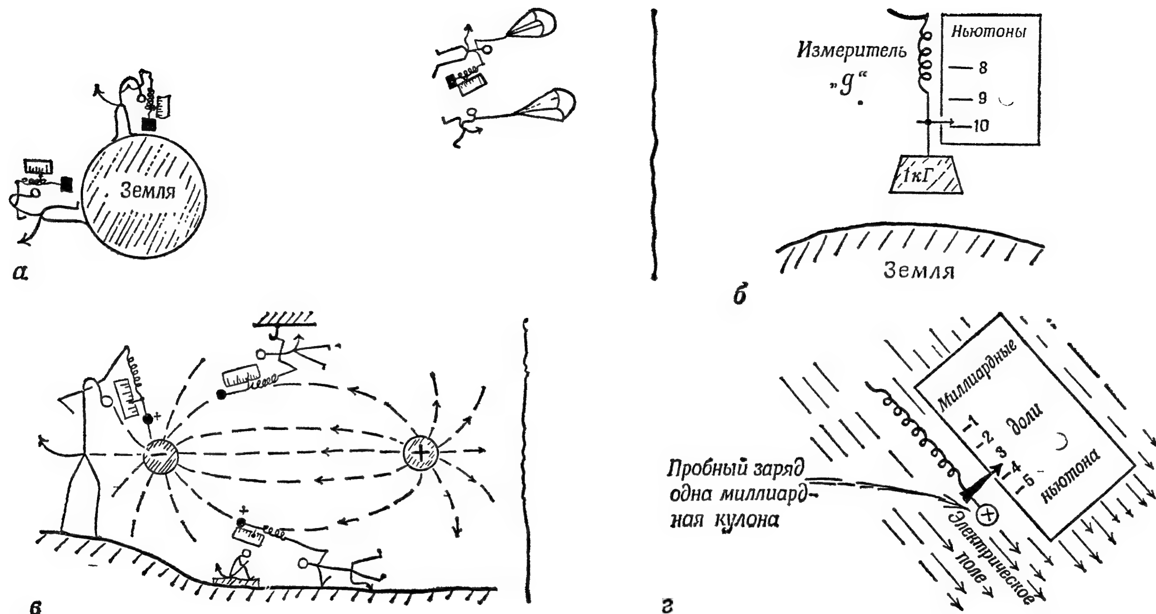
Калибровка весов

б

Фиг. 69. Проверка закона обратной пропорциональности квадрату расстояния.

Электрические поля

Мы представляем себе, что с каждым зарядом связано электрическое поле, подобное в известном смысле полю тяготения. *Напряженность электрического поля в любой точке определяют как силу, действующую на пробный кулон, помещенный в эту точку.* Принимая во внимание, что 1 *кулон* — огромный заряд, сформулируем



Фиг. 70. Измерение напряженности поля.

а и *б* — измерение напряженности гравитационного поля Земли; сила притяжения эталона килограмма измеряется в ньютонах; *в* — измерение напряженности электрического поля; *г* — «измеритель напряженности электрического поля».

Чтобы избежать искажения измеряемого поля и не иметь дела при измерениях с огромными силами, пробный заряд должен быть значительно меньше, чем 1 *кулон*. Тогда мы должны будем измерять силу, действующую, скажем, на заряд в 1 миллиардную кулона, с помощью пружинных весов, проградуированных в миллиардных долях ньютона. При этом мы определим напряженность поля в *ньютон/кулон*.

это определение более реалистически следующим образом:

$$\text{НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ} = \frac{\text{СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА МАЛЫЙ ПРОБНЫЙ ЗАРЯД}}{\text{ВЕЛИЧИНА ПРОБНОГО ЗАРЯДА}}.$$

Мы получаем силу, действующую на единичный заряд, в *ньютон/кулон* [1].

На фиг. 70 показаны «демоны», занятые экспериментальным исследованием напряженности поля тяготения и электрического поля.

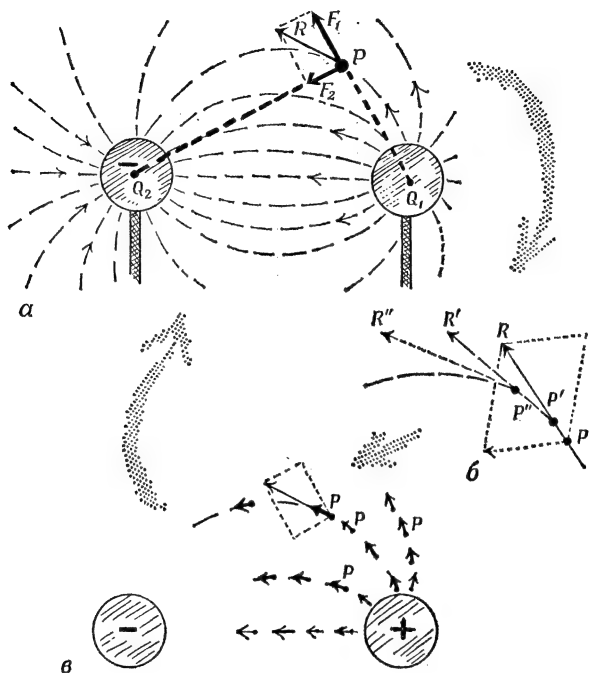
Напряженность поля вокруг малого изолированного заряда изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния.

$$\text{НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ} = \frac{\text{СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА ПРОБНЫЙ ЗАРЯД}}{\text{ПРОБНЫЙ ЗАРЯД}} = \frac{\mathcal{B}Q\cdot(\text{пробный заряд } q)/d^2}{\text{Пробный заряд } q} = \frac{\mathcal{B}Qq/d^2}{q} = \frac{\mathcal{B}Q}{d^2}.$$

То же самое справедливо для изолированного заряженного шара. Напряженность поля — вектор. Кроме величины, поле характеризуется направлением силы, действующей на положительный пробный заряд. Можно начертить карту направлений электрического поля с помощью воздушного шарика, реального или воображаемого, несущего малый пробный заряд. На фиг. 71 показаны два громадных металлических шара, заряженных положительно и отрицательно. Заряженный воздушный шарик будет перемещаться от одного шара к другому вдоль любой из траекторий, показанных пунктирными линиями. Они называются *силовыми линиями*. Эти линии указывают направление поля, т. е. направление результирующей силы, действующей на пробный заряд. Силовые линии искривлены потому, что на пробный заряд действуют силы отталкивания со стороны одного заряда, $+Q_1$, и силы притяжения со стороны другого заряда, $-Q_2$, которые

[1] Если заряды находятся на металлических предметах, то введение пробного заряда в пространство между ними привело бы к смещению первоначальных зарядов и тем самым к изменению поля, которое мы пытаемся измерить. Чем меньше пробный заряд, тем меньше это изменение поля. Поэтому мы берем все меньший и меньший заряд и мысленно совершаем математическую операцию перехода к пределу. ПРЕДЕЛ отношения СИЛА/ЗАРЯД мы называем НАПРЯЖЕННОСТЬЮ ПОЛЯ. Предел в математическом смысле и в этом случае представляет собой идеальную меру физической величины, как было указано в гл. 1, когда шла речь об ускорении, давлении и плотности; но и здесь атомистическая природа электричества не позволяет нам достичь этого предела.

изменяются по направлению и по величине от точки к точке. Пользуясь правилом сложения векторов, можно найти конфигурацию силовых линий в подобных случаях, хотя это связано с утомительной процедурой. Предположим, два заряда, создающие поле,

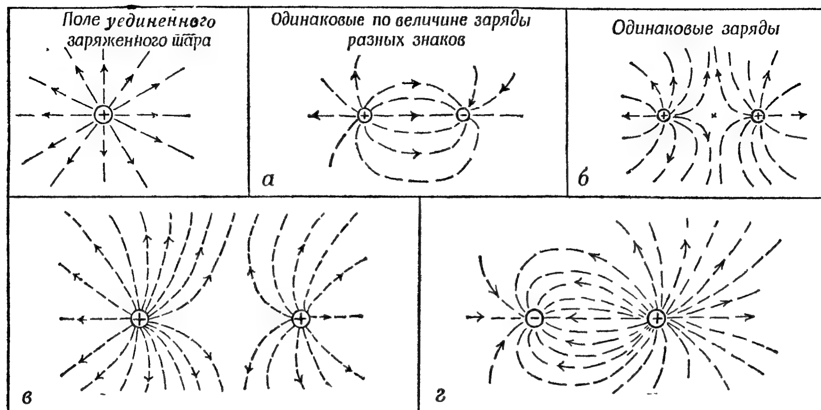


Фиг. 71. Определение конфигурации электрического поля.

Путем геометрического построения находят последовательно в разных точках направление результирующей силы, приложенной к пробному заряду.

равны и противоположны по знаку. Пробный заряд q, помещенный в точку P, испытывает силу отталкивания F_1 со стороны заряда Q_1 и меньшую силу притяжения F_2 со стороны заряда Q_2 (меньшую потому, что Q_2 дальше). Сложение этих сил дает результирующую силу R, действующую на q. В точке P силовая линия поля направлена вдоль R. Повторим теперь это рассмотрение для другой, соседней точки P', затем для точки P'' и т. д. Точка P' выбрана на малом расстоянии от P, отсчитанном практически вдоль силы R (которая указывает направление поля в P),

точка P'' взята на R'. Можно затем объединить эти построения и получить часть силовой линии. Существуют методы, приводящие к цели быстрее. В них используются более сложные геометрические представления, но в основе лежит тот же закон обратной



Фиг. 72. Картины электрических полей.

пропорциональности квадрату расстояния. Эти методы дают целую сетку силовых линий и позволяют определить картину силовых линий других полей, например, показанных на фиг. 72.

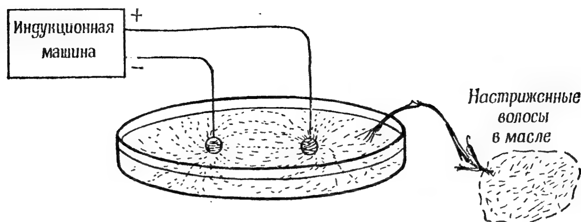
Задача 8

а) Заряды, поле которых показано на фиг. 72, в, не равны. Какой из них больше?
б) Дайте обоснование вашему ответу на вопрос а).
в) Дайте ответ на вопросы а) и б) для зарядов, поле которых показано на фиг. 72, г.

Картины электрического поля

Картину электрического поля можно получить, используя маленькие кусочки материала, которые способны выстраиваться вдоль силовых линий поля. Правда, эти демонстрационные опыты не позволяют «наблюдать» электрические поля столь же отчетливо, как магнитные поля с помощью железных опилок. Металлические предметы, имитирующие Q_1 и Q_2, заряжают какой-нибудь

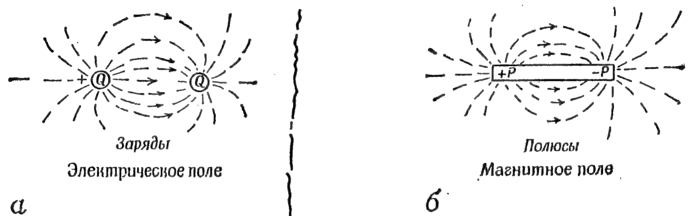
машиной, не останавливая ее, чтобы восполнять утечку заряда. Стеклянную ванну наполняют машинным маслом и в масло насыпают мелко настриженные волосы. Затем в ванну погружают металлические электроды. Волосы располагаются вдоль силовых



Фиг. 73. Определение конфигурации электрического поля опытным путем.

В чашу с густым маслом насыпают мелко настриженные волосы и создают сильное электрическое поле.

линий поля. В кусочках волос создаются парные заряды, и они стремятся расположиться вдоль силовых линий. Вам следовало бы посмотреть эти картины электрических полей и сравнить их с аналогичными по конфигурации магнитными полями (см. гл. 34). На фиг. 74 показано электрическое поле, созданное равными и



Фиг. 74.

противоположными по знаку зарядами $+Q$ и $-Q$, и магнитное поле вокруг стержневого магнита с «полюсами» $+P$ и $-P$. Если на изображение электрического поля нанести контуры магнита, то обе картины будут в точности одинаковы. Обе построены, исходя из направления сил, обратно пропорциональных квадрату расстояния, которые действуют на воображаемое очень малое пробное тело. Закон обратной пропорциональности квадрату

расстояния можно выразить математически простой общей формулой, которая позволяет рассчитать пространственную конфигурацию любого поля сил, обратно пропорциональных квадрату расстояния. Эта формула кажется простой для математиков и сложной для неспециалистов. Вот эта формула, которую мы приводим просто шутки ради:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial z^2}=0.$$

Символ V обозначает в ней разность потенциалов между данной точкой пространства и некоторым опорным нулевым уровнем, за который принимают потенциал земли, или точки, находящейся в бесконечности. Эта формула настолько важна, настолько универсальна, что для нее ввели даже сокращенную форму написания $\nabla^2 V=0$ (читается: набла квадрат V равно нулю). Написаны целые книги, посвященные решению конкретных задач с помощью этой формулы для точечных зарядов, заряженных шаров, цилиндров, тел неправильной формы, сложных конфигураций зарядов. Закон обратной пропорциональности квадрату расстояния применим, кроме того, к гравитационным полям, к задачам о распространении тепла путем теплопроводности, к задачам о течении воды и т. д., а также к магнитным полям (с существенными ограничениями). Таким образом, решения уравнения $\nabla^2 V=0$, которые дают картину электрического поля для некоторой конфигурации зарядов, позволяют также найти магнитное поле или картину течения воды при соответствующей конфигурации источников и стоков. Результаты измерений, проведенных для поля одного рода, можно перенести на поле другого рода. Например, какую-нибудь задачу о теплопроводности, важную для проектирования двигателя, может оказаться трудно исследовать экспериментально, но можно исследовать электрическое поле заряженных тел, которым придана такая форма, чтобы имитировать источник тепла. Между течением воды и электрическим полем как будто бы небольшая связь; в самом деле, реальной физической связи мало, а то и вовсе никакой, существует лишь некая формальная связь геометрического описания в том и другом случаях. Тем не менее, если обратиться к конфигурации течения в резервуаре с источником и стоком, представленной на фиг. 226 в гл. 9, то вы обнаружите картину электрического поля, созданного равными по величине положительным и отрицательным зарядами.

Это показывает, как одну и ту же математическую теорию можно применить к различным областям знаний. Мы не знаем,

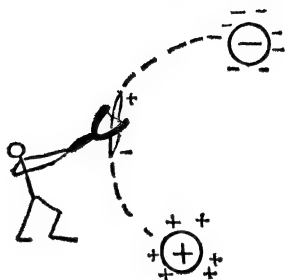
когда именно проявление закона обратной пропорциональности квадрату расстояния, изученное в какой-нибудь одной области физики, внезапно приобретет важное значение, и труды, в которых оно изложено, достанут с полки, чтобы использовать в другой области. Например, физики давно установили, что закон обратных квадратов должен быть применим к диффузии растворенных солей в жидкости — растворяющийся в кофе сахар распространяется вдоль линий тока, подобных линиям тока воды в озере; скорость диффузии связана с концентрацией соли «законом Фика», который на самом деле является частным случаем закона обратной пропорциональности квадрату расстояния. Много лет спустя исключительно важное значение приобрела задача о диффузии нейтронов в ядерном реакторе. К услугам физиков сразу же оказались закон Фика и множество готовых решений.

Картины поля и силы

Иногда творения кисти художника позволяют нам таинственным образом заглянуть в глубь его характера. Картины электрического поля точно так же позволяют сделать целый ряд выводов. Они должны дать вам возможность увидеть, как противоположные по знаку заряды цепко притягивают друг друга, а одноименные заряды отталкиваются, словно столкнувшись буферами, как взметаются вверх листочки электроскопа, как будто потянули за шнурок, которым поднимают шторы. Для Фарадея, размышлявшего над электрическими и магнитными полями столетие назад, эти силовые линии были в самом деле вполне реальными. Он представлял их себе в виде упругих трубок, каждая из которых начинается на положительном заряде, а заканчивается на равном ему по величине отрицательном заряде, развивает тянущее усилие вдоль своей оси и, раздаваясь в толщину, давит на соседние трубки. Такой образ мышления помогал Фарадею в его экспериментальных исследованиях и позволил ему подготовить базу, на которой зиждется электромагнитная теория света Максвелла. Мы и сейчас находим это представление полезным. Мы говорим даже о радиоволне как о колебании, распространяющемся вдоль силовой линии электрического поля, подобно волне, бегущей по веревке, хотя на самом деле это образное описание радиоволны вводит в заблуждение. Большинство ученых не мыслят категориями мистического «действия на расстоянии», мгновенно перекрывающего пустое пространство, отделяющее объект действия от источника действия, идет ли речь о силах тяготения или силах

электрического притяжения. Вместо этого мы представляем себе, что воздействия переносятся полем (гравитационным или электрическим). Изменения, которые претерпевает сила, распространяются в виде изменений поля с определенной конечной скоростью.

Каждая силовая линия — это линия, вдоль которой маленький пробный заряд перемещается под действием электрического поля. В каждой точке силовой линии касательная к ней совпадает с направлением результирующей сил притяжения и отталкивания со стороны всех других зарядов, действующих на пробный заряд.

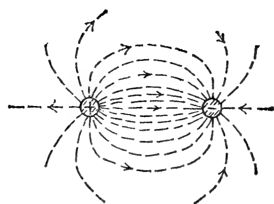


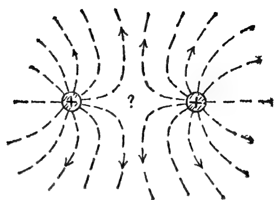
Фиг. 75. Исследование карты силовых линий электрического поля с помощью легкой стрелки, вращающейся на оси в центра́х.

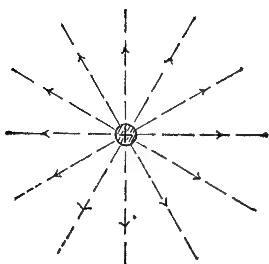
Можно наблюдать картины электрического поля (с помощью мелко настриженных волос в масле или маленькой стрелки, вращающейся в центра́х) или найти конфигурацию поля геометрическим построением, используя утомительный способ векторного сложения сил, обратно пропорциональных квадрату расстояния, для нахождения направления результирующей. Можно также воспользоваться замысловатой смесью математического анализа и геометрии и рассчитать конфигурацию поля из уравнения $\nabla^2 V=0$. Все эти методы приводят, разумеется, к одному и тому же результату. На фиг. 76 показаны картины электрического поля для некоторых случаев, а ниже даны пояснения к ним в духе представлений Фарадея.

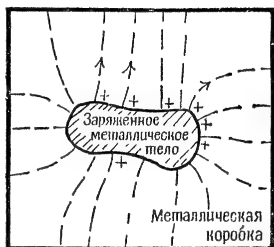
а) *Силовые линии идут от положительного заряда к отрицательному.* Они тянут разноименные заряды друг к другу. (Силовые линии натянуты, и это обусловливает взаимное притяжение зарядов.)

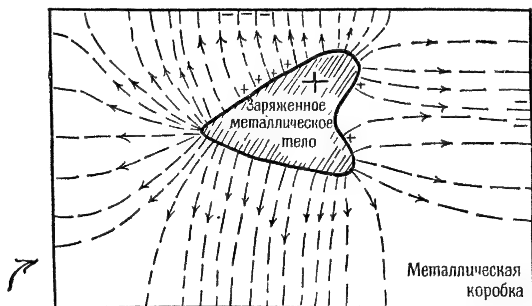
б) *Силовые линии электрического поля в пространстве между двумя положительными зарядами расходятся друг от друга подобно вагонеткам, столкнувшимся буферами. Можно указать «нейтральную точку», в которой поля сил отталкивания обоих зарядов в точности гасят друг друга.* (Силовые линии словно раз-

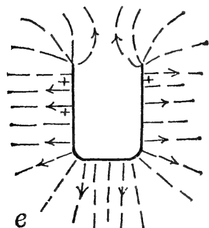


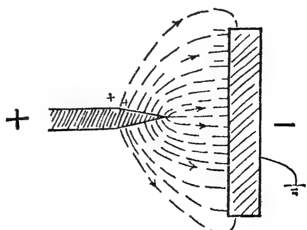












Фиг. 76. Картины электрических полей.

даются в толщину под действием давления и отталкиваются друг от друга в разные стороны; это обусловливает, или, можно по крайней мере сказать, иллюстрирует отталкивание.)

в) Силовые линии поля одиночного заряда представляют собой радиальные прямые, которые расходятся от заряда лучами, подобно силовым линиям гравитационного поля точечной массы или шара. (Чем дальше от заряда, тем меньше густота линий; это иллюстрирует ослабление поля с увеличением расстояния.)

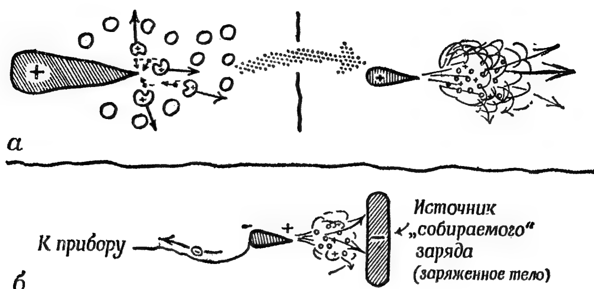
г) *Силовые линии поля, образованного любым заряженным куском металла, направлены перпендикулярно к поверхности.* Они никогда не исходят от поверхности под другими углами. (Силовые линии поля покоящихся зарядов не могут быть наклонены к поверхности металла. В последнем случае они имели бы у поверхности составляющую, направленную *вдоль* поверхности; под действием этой составляющей вдоль поверхности происходило бы перемещение зарядов [1], на которых оканчиваются силовые линии, пока не установилось бы новое распределение зарядов, при котором силовые линии перпендикулярны к поверхности проводника.)

д) *Силовые линии, исходящие от заряженного проводника неправильной формы, сгущаются вблизи любого выступа или острия; вблизи вогнутостей или полостей густота силовых линий уменьшается.* (Вблизи острия силовые линии могут расходиться радиально в область, где их густота уменьшается; таким образом, боковое давление, которое силовые линии испытывают со стороны своих соседей, «сталкивает» их с ровных мест в область выступов. Это не очевидно, зато обратный эффект, связанный с полостями, легко себе представить: если бы силовые линии заходили внутрь полости, то они должны были бы «вытолкнуть» друг друга оттуда.)

е) *Если силовые линии исходят от положительно заряженного острия, находящегося вблизи отрицательно заряженного плоского проводника, то они сгущены вокруг острия, где поле очень сильное, и расходятся в большую область вблизи плоскости, на которой оканчиваются, входя в плоскость перпендикулярно.* Электрическое поле вблизи острия очень сильное. Оно может оказаться настолько сильным, что под его действием блуждающий электрон будет в состоянии бомбардировать молекулы воздуха и освобождать новые заряженные частицы — крошечные носители электричества. Первоначальный заряд на острие в этом случае притягивает вновь образованные носители зарядов противоположного знака. Притя-

---

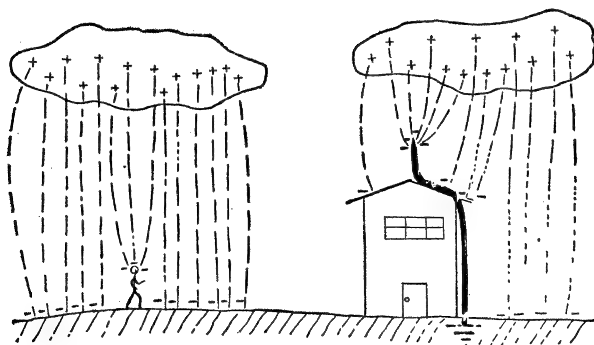
[1] Иначе говоря, в металле существовали бы токи, приводящие к перераспределению зарядов.



Фиг. 77. Действие заряженного острия в воздухе.

а — сильное электрическое поле вблизи острия вырывает электроны из нескольких атомов, оставляя атомы положительно заряженными. Как электроны, так и заряженные атомы совершают медленное перемещение в электрическом поле. Носители заряда противоположного знака движутся к острию и нейтрализуют часть находящегося на нем заряда. Носители одноименного заряда устремляются в направлении от острия, создавая «ветер», уносящий заряд.

б — когда с помощью острия «собирают» заряд с какого-то источника, то ветер, идущий от острия, нейтрализует часть заряда источника, и острие приобретает соответствующий заряд. Этот метод можно применить для «собирания» заряда с движущихся тел (например, с ленты в генераторе Ван-де-Граафа), когда трущимся приспособлением для «собирания» заряда можно причинить какое-нибудь повреждение.



Фиг. 78. Грозовые облака часто несут огромные электрические заряды, возникающие, возможно, при раздроблении дождевых капель.

Они индуцируют заряды противоположного знака на крышах строений и поверхности Земли. Если поле системы заряженных тел становится достаточно сильным, чтобы вызвать образование заряженных носителей из молекул воздуха, то может возникнуть вспышка молнии. Воздух оказывается довольно хорошим проводником для начавшейся вспышки молнии, и может пройти колоссальный ток.

гиваясь к острию, они нейтрализуют часть находящегося на нем первоначального заряда. Носители заряда того же знака, что и заряд на острие, отталкиваются и стремительно уносятся прочь, увлекая за собой, благодаря столкновениям, молекулы воздуха и создавая «электрический ветер». Этот заряженный ветер используется для нанесения заряда на ленту в генераторе Ван-де-Граафа. Электрический ветер можно использовать и для «собирания» заряда с заряженного предмета; в этом случае он служит для нейтрализации заряда противоположного знака. В конце этой книги вы встретитесь с применением сильного электрического поля, создаваемого острием заряженной иглы, для фотографирования атомов!

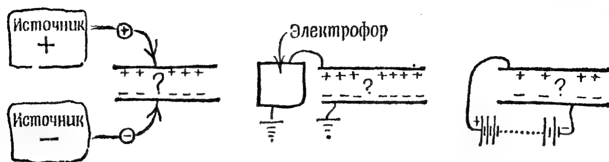
Еще более сильное поле может вызвать появление искр в воздухе вблизи острия или образование электронных лавин вокруг нити в счетчике Гейгера. Могут возникнуть даже гигантские вспышки между заряженными облаками и высоким деревом или верхом крыши. Заостренные металлические стержни, применяемые для защиты зданий, представляют собой молниеотводы, благодаря которым возникают слабые, невидимые и безвредные вспышки молнии, прежде чем разность потенциалов в электрическом поле между грозовым облаком и землей достигнет опасной величины. Но даже в случае большой вспышки молнии острие стержня служит местом, где разряд начинается раньше всего, и по стержню ток разряда отводится на землю, так что опасности не возникает.

Каждая силовая линия должна начинаться на положительном заряде и оканчиваться на отрицательном. Вспомните, что силовая линия указывает направление результирующей силы, действующей на малый положительный пробный заряд, и вы сразу согласитесь, что каждая силовая линия должна проходить именно так: от положительного заряда к отрицательному.

Отсюда следует, что сгущение силовых линий вблизи заряженной поверхности должно означать увеличение плотности заряда на поверхности. Если это так, то на поверхности металлического тела неправильной формы заряд должен распределяться неравномерно: плотность заряда должна быть наибольшей вблизи острых выступов и наименьшей во впадинах и вогнутостях. Мы уже проверили это предположение, поднося маленький заряженный пробный шарик или пластинку к электроскопу (фиг. 61).

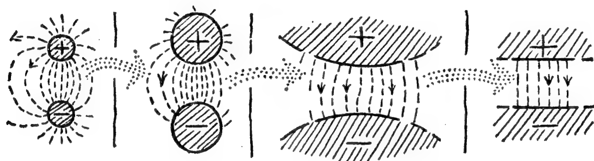
ж) *Электрическое поле в пространстве между параллельными заряженными пластинами однородно*. Это поле удобно тем, что его напряженность можно рассчитать по показанию вольтметра. Мы будем пользоваться им при измерении постоянной $\mathscr{B}$, входящей

в выражение закона Кулона, а позднее — при воспроизведении опыта Милликена, в котором измеряется заряд отдельного электрона. Постарайтесь представить себе картину этого поля, глядя на поле между двумя заряженными шарами и мысленно увеличи-



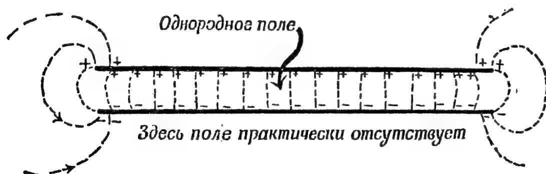
Фиг. 79. Заряжение параллельных пластин.

вая диаметр шаров. Произведите в своем воображении экстраполяцию к предельному случаю бесконечно больших шаров (когда их поверхность плоская), между которыми по-прежнему остается малый воздушный промежуток. Но это лишь мысленные построе-



Фиг. 80. Экстраполяция.

ния. Прибегнув к помощи алгебры или исследуя конфигурацию поля экспериментально, мы убеждаемся в том, что поле на самом деле такое, как показано на фиг. 81.



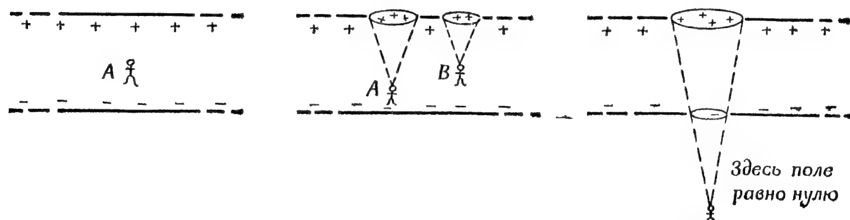
Фиг. 81.

В области между пластинами силовые линии представляют собой ряд параллельных и равноотстоящих прямых. (Интересно, что можно доказать математически с помощью уравнения $\nabla^2 V=0$, что *если* силовые линии параллельны друг другу, то они *должны*

быть равноотстоящими прямыми.) Поле в этом случае всюду одинаково направлено и имеет одинаковую напряженность [1]; каким образом малый пробный заряд, помещенный между пластинами, смог бы узнать, где он находится среди леса параллельных силовых линий? Мы называем такое электрическое поле однородным. За пределами пластин поле практически отсутствует, если не считать областей вблизи краев пластин, где силовые линии выгибаются наружу (так называемый «краевой эффект»).

---

[1] Вообразите себя в роли положительного пробного заряда электричества. Доберитесь до точки A, находящейся между необъятным по площади положительно заряженным потолком и таким же необозримым отрицательно заряженным полом, и посмотрите, какие заряды на вас действуют. Вверху вы видите положительно заряженный потолок, пластину бесконечно большой площади, покрытую ровным слоем заряда. Сместившись в сторону, вы увидите то же самое, если пластины бесконечно протяженные. Переместившись кверху и продолжая смотреть вверх, вы увидите, что приблизились к какой-то части потолка. При этом любой конус в пределах вашего угла зрения будет захватывать меньшую область потолка. Оба фактора, а именно изменение обратной величины квадрата расстояния до потолка и изменение площади потолка, охватываемой взглядом, прямо пропорциональное квадрату рас-



Фиг. 82.

стояния, в точности компенсируют друг друга. Поэтому вы будете испытывать одну и ту же силу отталкивания со стороны потолка, на какой бы высоте вы ни находились. Точно так же пол будет действовать на вас с одинаковой силой притяжения независимо от того, где вы находитесь. Следовательно, вы могли бы считать, что попали в однородное поле. (По той же причине, если рассматривать рассеяние света, белый потолок над вами казался бы вам по мере приближения к нему точно таким же, а вовсе не более ярким.)

Если вы находитесь за пределами пространства между пластинами, скажем под ними, то вверху было бы два потолка: отрицательно заряженная пластина прямо над вами и положительно заряженная пластина над нею. Вторая пластина, лежащая выше первой, если она бесконечно протяженная, действовала бы на вас с силой отталкивания, равной силе притяжения со стороны нижней пластины. Поэтому вы пришли бы к выводу, что находитесь в области, где результирующее поле равно нулю.

Пробный заряд величиной 1 *кулон* испытывал бы действие одинаковой силы в любой точке этого поля. Предположим, эта сила равна X *ньютон*. Значит, напряженность поля равна X *ньютон* на кулон. Давайте поручим некоему мифическому существу — демону протащить кулон от одной пластины до другой по силовой линии против электрической силы, действующей на кулон. Демону потребуется топливо, чтобы совершить работу, т. е. определенный запас энергии, которую он преобразует в потенциальную энергию кулона в электрическом поле. Демон дол-



Фиг. 83. Xd *ньютон·м/кулон* = V *дж/кулон.*

жен прикладывать к переносимому кулону силу X *ньютон* на пути d *м* от одной пластины до другой. Он должен совершить работу при перемещении одного кулона, равную

$$\text{СИЛА}\cdot\text{РАССТОЯНИЕ} = (X \text{ ньютон})\cdot(d \text{ м}) = Xd \text{ дж}.$$

Но это *не что иное*, как энергия, сообщаемая одному кулону при прохождении от одной пластины до другой; это разность потенциалов, выраженная в джоулях на кулон, или вольтах. Следовательно, если вольтметр, подключенный к пластинам, показывает V *в*, то

$$Xd \text{ дж/кулон} = V \text{ в}.$$

Отсюда

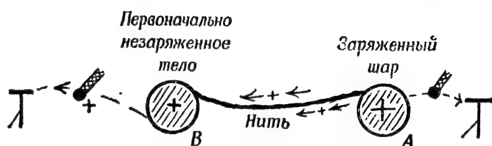
$$\text{НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ } X \text{ ньютон/кулон} = \frac{V}{d} \text{ в/м}.$$

Таким образом, с помощью вольтметра и линейки можно измерить напряженность поля X; это оказывается удобным при проведении ряда важных опытов.

Изоляторы и проводники

Опыты показывают, что заряженные тела, помещенные на подставку из сухого плексигласа, серы или эбонита, продолжают оставаться заряженными. Мы называем такие вещества изолято-

рами. По металлической проволоке, графиту, влажной нити и т. д. заряды могут перемещаться. Эти тела «проводят» положительные и отрицательные заряды друг к другу, в результате чего они нейтрализуются; при посредстве этих тел можно произвести перераспределение заряда между заряженными металлическим телом и каким-либо другим проводящим телом. Если последним является тело огромных размеров, такое, как Земля, то оно забирает столь большую долю заряда, что весь заряд первого тела исчезает. Мы называем тела, проводящие электричество, проводниками. Вода,



Фиг. 84. Демонстрация медленного движения заряда по влажной бечевке.

Для перенесения пробного заряда к каждому электроскопу служит маленький шарик. Заряд шара *B* увеличивается, а шар *A* теряет часть заряда.

будучи очень плохим проводником по сравнению с металлами, все же проводит заряды достаточно быстро, чтобы помешать целому ряду опытов. Некоторые изоляторы, в частности стекло, питают склонность к воде, и на них образуется пленка из молекул воды. Стеклянные стержни почти совершенно непригодны в качестве изоляторов для опытов по электростатике, если их специально не просушить.

Задача 9

«Стекло притягивает молекулы воды». Это известный вывод, к которому приводит изучение поверхностного натяжения. Какой способ экспериментальной проверки вы бы предложили для выбора изолятора, при работе с которым не возникало бы больших трудностей из-за его увлажнения?

Ток — это движение зарядов

Когда по проводнику движутся заряды по направлению к какому-либо заряженному телу или от него, мы говорим, что течет ток. Обнаружить действия тока (тепловое действие, химические эффекты, магнитное поле) можно, но они очень слабы [1]. Роуленд в 1876 г. проделал в этой связи замечательный опыт. Он раскрутил колесо, на обод которого были нанесены за-

[1] Заряды, с которыми имеют дело в опытах по электростатике, очень малы, меньше одной миллионной кулона. Разности потенциалов велики: 10 000 *в* для заряженной пластинки электрофора, миллионы вольт в больших машинах. В очень грубом приближении можно считать, что для возникновения искры длиной 2,5 *см* в воздухе требуется напряжение 50 000 *в*.

ряды, и наблюдал такое же магнитное поле, какое создал бы ток, текущий по ободу. Подключите в лаборатории батарею к пластинам очень большого «конденсатора» и отметьте с помощью измерительного прибора кратковременный импульс тока, связанного с движением зарядов к пластинам под действием батареи (опыт 7 гл. 41).

Вспомним теперь, как мы начали с заряжения тел от батареи, и вернемся снова к измерительным приборам и батареям, которыми пользуются в современной электротехнической лаборатории. Батареи являются источником статических зарядов, обладающих точно такими же свойствами, что и заряды, получаемые при натирании стержня. Кулоны зарядов Q_1 и Q_2, входящих в выражение закона Кулона, точно такие же, как кулоны, фигурирующие в соотношении «1 *а*=1 *кулон/сек*». Они одинаковы по природе, и мы приравниваем их по величине путем надлежащего выбора значения $\mathscr{B}$. (При экспериментальном определении значения $\mathscr{B}$ мы будем пользоваться для измерения напряженности электрического поля обычным вольтметром, градуированным в *дж/кулон.*) Отныне мы будем пользоваться полным набором нашего оборудования, измеряя напряжение либо вольтметром, либо электроскопом, и брать заряды с одинаковым успехом от электрофора, генератора Ван-де-Граафа, батареи или даже от сетевого источника питания с трансформатором и выпрямляющим диодом.

Модернизация представлений

Почему не пойти еще дальше в этой модернизации точки зрения и не излагать всю электростатику с помощью представления о свободных электронах? Просто потому, что ни один из экспериментов, рассмотренных до сих пор в этой главе, не обнаружил какого-либо явления, для описания которого необходимо привлечь электроны. Кроме того, существуют *положительные* заряды, в некоторых веществах движутся именно они.

Мы теперь знаем, что в металлических проводниках роль подвижных зарядов играют отрицательные электроны. Они могут свободно проходить через кусок металла, тогда как положительные заряды неподвижно закреплены в атомах твердого тела — металла. Таким образом, когда говорят, что «положительные заряды уходят по проволоке к земле», следовало бы сказать: «отрицательные заряды (электроны) идут по проволоке от земли и нейтрализуют положительные заряды у верхнего конца своего пути». Говоря: «шар, несущий положительные заряды», мы должны были бы сказать: «шар, с которого удалены отрицательные электроны». Когда говорят, что положительно заряженный шар, помещенный вблизи металлического стержня, «притягивает отрицательные заряды и отталкивает положительные заряды к другому концу стержня», следовало бы сказать: «притягивает отрицательные заряды, в то время как положительные заряды (нескомпенсированные) остаются у другого конца стержня».

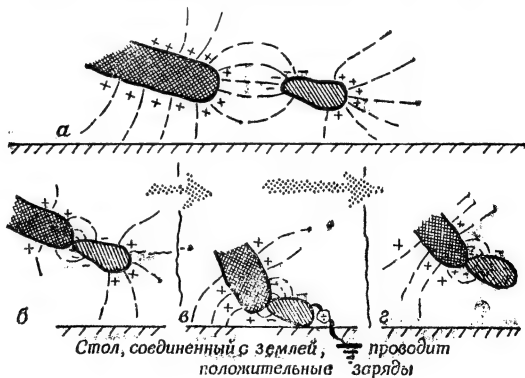
В то же время в наших первых опытах ничуть не менее удобно считать, что движутся и положительные, и отрицательные заряды. В таком случае, *поскольку неважно*, движутся ли те и другие заряды или только отрицательные электроны, было бы антинаучно в этой связи настаивать на существовании какого-то различия. Тут вы сталкиваетесь с современной проблемой науки: хороша ли теория, которая *удобна*, *непротиворечива* и вполне *подходит* для объяснения рассматриваемого случая, или она должна быть, кроме того, истинной? Если вам сразу же необходимы настоящие электроны, то сформулируйте для себя с их помощью все прежние объяснения. Если вы

приняли непреклонную позицию многих современных теоретиков, то придерживайтесь старой точки зрения, пока не столкнетесь со случаями, когда существенно, что «движутся только электроны». В необходимости ввести в рассмотрение электроны вы убедитесь дальше в этой книге; мы будем тогда пользоваться ими в полной мере.

Эбонитовый стержень отнимает электроны у меха, стеклянный стержень отдает их шелку. Мы знаем теперь, что любые два вещества, приведенные в соприкосновение друг с другом, обмениваются каким-то количеством электронов, причем одно приобретает добавочные электроны (приобретая тем самым отрицательный заряд), а другое теряет часть своих (становится положительно заряженным). Этот обмен электронами продолжается очень недолго после того, как оба тела приводятся в контакт. Обмен происходит до тех пор, пока не установится небольшая разность потенциалов (созданная разделенными при обмене положительными и отрицательными зарядами), которая препятствует дальнейшей миграции зарядов. При разобщении обоих тел механическое отделение одного тела от другого приводит к увеличению этой разности потенциалов, в результате чего разделенные заряды могут даже быть возвращены на место. Чтобы получить большой величины заряд «трением», необходим контакт между телами, причем дело тут не в трении, а в относительной скорости: быстро проведите шелком по стеклянному стержню, словно смахивая с него пыль,— не натирайте его.

Самый первый опыт по электростатике: притяжение мелких кусочков материала

Опыт, который проделывали древние греки, наблюдавшие притяжение мелких кусочков дерева и т. д. натертым янтарем, не так легко объяснить, как обычно полагают. Почему заряженное тело должно притягивать незаряженные кусочки материала? Потому что оно индуцирует в них заряды. Но тогда эти кусочки должны быть из металла, чтобы могло произойти разделение индуцированных зарядов. В самом деле, легкие кусочки металла, например мелкие обрывки



Фиг. 85. Заряженный изолятор притягивает мелкие стружки металла.

алюминиевой фольги, очень хорошо притягиваются заряженным стержнем, и объяснением этому служит взаимодействие с индуцированными зарядами. С кусочками идеального изолятора едва ли можно было бы наблюдать какой-нибудь эффект, но кусочки дерева или бумаги всегда обладают достаточной влажностью, которая делает их слегка проводящими. Если эти кусочки лежат на столе, связанном с землей, то «одноименный» наведенный заряд может уходить в землю, тогда притяжение будет еще сильнее. Это явление иллюстрирует фиг. 85.

На самом деле, однако, притягиваются даже идеальные изоляторы, хотя чаще всего слабо. По-видимому, заряды внутри молекул могут несколько смещаться в противоположные стороны, в результате чего молекулы становятся как бы *электрически вытянутыми* или *поляризованными*, и заряды на конце молекулы, ближайшем к поднесенному заряженному телу, притягиваются. Даже атом может быть поляризован, когда его электронное облако и ядро оттягиваются в противоположных направлениях. Именно так чаще всего притягивают друг друга атомы и молекулы при сближении; ван-дерваальсовы силы поверхностного натяжения — это электрические силы, обусловленные поляризацией молекул в полях своих соседей.



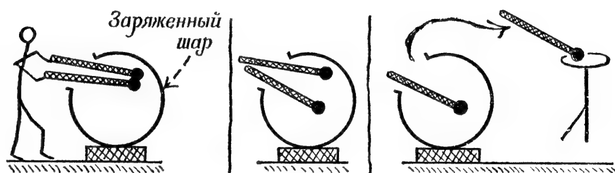
Фиг. 86. Поляризация молекулы.

Экспериментальное подтверждение закона обратной пропорциональности квадрату расстояния

Вместо измерения силы взаимодействия между двумя малыми зарядами закон обратной пропорциональности квадрату расстояния можно проверить косвенным, но не менее надежным путем, проделав удивительно простой решающий эксперимент. *Если этот закон справедлив, то внутри пустой металлической коробки электрическое поле отсутствует, как бы сильно она ни была заряжена*, и наоборот. Возьмите замкнутую металлическую коробку любой формы — цилиндрический стакан, полый шар, куб — и сообщите ей большой заряд. Затем выясните, что́ делается внутри коробки: есть ли там электрическое поле. Проверьте, если хотите, есть ли внутри коробки заряды, ибо там, где есть электрические заряды, должно быть и поле. Опыт показывает, что внутри коробки нет зарядов (если только не ввести внутрь дополнительные заряды с каким-либо предметом, укрепив его на *изолирующей опоре*) и нет электрического поля. Вам следует самим посмотреть, как

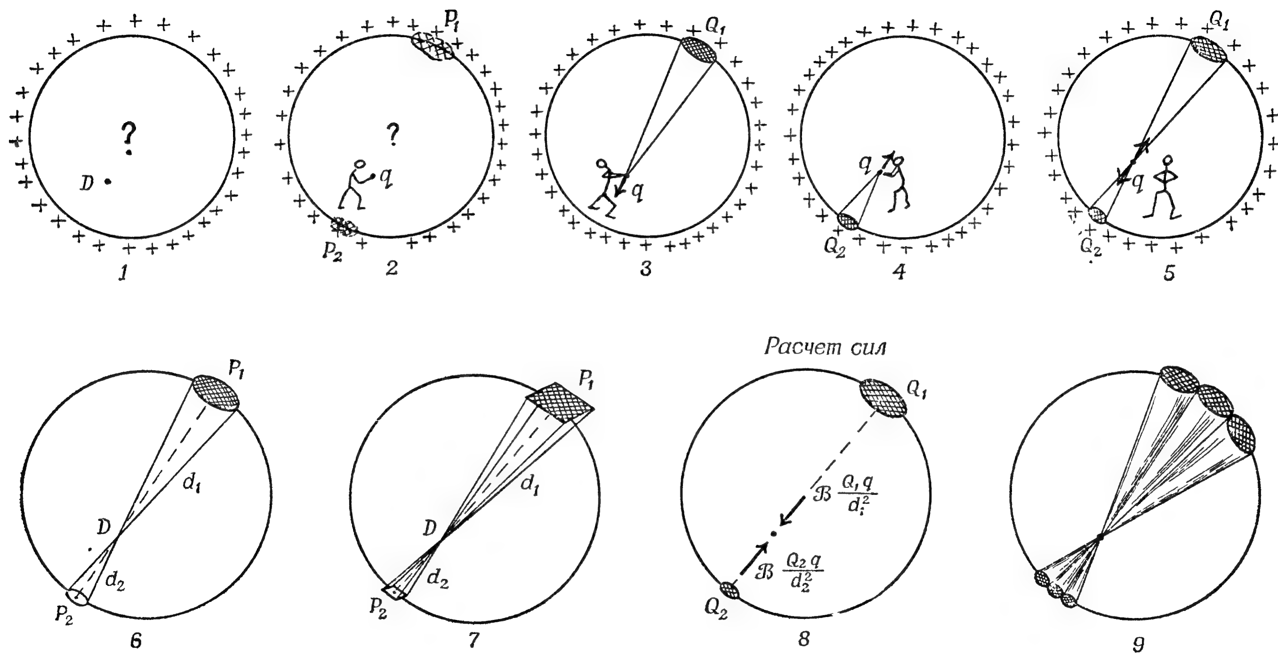
проделывается этот опыт. Можно произвести его с небольшой полой металлической сферой и пробными шариками. А можно последовать примеру Фарадея, который забирался в большую проволочную клетку, предварительно заряженную. Несмотря на то что с внешней поверхности клетки вылетали искры, внутри не удавалось обнаружить никаких эффектов. Опыт простой и очевидный, но почему он подтверждает справедливость закона обратной пропорциональности квадрату расстояния?

Мы рассмотрим доказательство для полого шара, хотя его можно распространить на замкнутую проводящую коробку любой формы. Мы избрали геометрическое тело, которое служит символом



Фиг. 87. Проверка закона обратной пропорциональности квадрату расстояния.

совершенства,— им, как вы увидите, давно пользовался Ньютон для гравитационного варианта этой задачи. Предположим, что шар, показанный в разрезе на фиг. 88, заряжен положительно. Из соображений симметрии можно заключить, что заряд равномерно распределен по всей его поверхности. Допустим, что некий наблюдатель пытается обнаружить электрическое поле в точке D внутри шара. Он видит область P_1 поверхности шара в пределах узкого конуса. Эта область несет заряд Q_1, который отталкивает положительный пробный заряд q наблюдателя в точке D. Если рассматривать заряд Q_1, то в точке D его поле отлично от нуля и направлено вдоль P_1D. Но, обернувшись назад, наблюдатель увидит противоположную область поверхности шара P_2, заряд которой Q_2 тоже вносит вклад в поле в точке D, но действует на пробный заряд в противоположном направлении. Теперь наблюдатель определяет границы обеих областей более тщательно, построив конус с вершиной в D и основанием P_1 и аналогичный конус с основанием P_2. Можно показать, что действия зарядов Q_1 и Q_2 в точности гасят друг друга. Если наблюдатель в D ближе к P_2, чем к P_1, то площадь области P_2 будет меньше и будет содержать меньший заряд. Значит, Q_2 меньше Q_1 и с этой точки зрения должен действовать на пробный заряд в точке D с меньшей силой. Но по закону обратной пропорциональности квадрату расстояния заряд Q_2, находящийся ближе, должен действовать на пробный



Фиг. 88. Электрическое поле внутри заряженного металлического шара.

заряд в точке D с большей силой, чем Q_1. Покажем, что оба фактора компенсируют друг друга. При равномерном распределении заряда по всей сфере — это обусловлено симметрией — заряд на одном квадратном сантиметре поверхности сферы будет всюду одинаков; заряд, приходящийся на два квадратных сантиметра, будет вдвое больше и т. д. Заряды областей P_1 и P_2 будут пропорциональны их площадям. Поскольку обе области выделены конусами с одинаковыми углами при вершине, их площади пропорциональны квадратам расстояний их от D[1]:

$$\frac{\text{площадь } P_1}{\text{площадь } P_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \text{ из геометрии.}$$

Следовательно,

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}.$$

Если закон Кулона справедлив, то следует ожидать, что силы, с которыми Q_1 и Q_2 действуют на очень малый пробный заряд q, равны $\mathcal{B} \cdot Q_1 \cdot q/d_1^2$ и $-\mathcal{B} \cdot Q_2 \cdot q/d_2^2$. Но мы показали, что Q_1 и Q_2 пропорциональны d_1^2 и d_2^2. Поэтому запишем вместо Q_1 и Q_2 Kd_1^2 и Kd_2^2. Тогда силы, действующие на пробный заряд q, будут равны

$$\frac{\mathcal{B} \cdot (Kd_1^2) \cdot q}{d_1^2} \quad \text{и} \quad -\frac{\mathcal{B} \cdot (Kd_2^2) \cdot q}{d_2^2}$$

или $\mathcal{B}Kq$ и $-\mathcal{B}Kq$, а эти силы равны и противоположны по направлению и, следовательно, взаимно уничтожаются. (См. ниже более краткий алгебраический вариант доказательства.)

Мы рассмотрели только пару узких конусов, выделяющих области P_1 и P_2. Можно представить себе еще одну пару конусов,

---

[1] Например, если P_2 в 3 раза дальше от D, чем P_1, то конус с вершиной в D расширяется в направлении к P_2 до тех пор, пока его основание у P_2 не станет в 3 раза шире, чем у P_1. Если это круговой конус, вырезающий на сфере круговую область, то диаметр области P_2 будет в 3 раза больше диаметра области P_1. Следовательно, диаметры относятся, как 3 : 1, отношение радиусов тоже 3 : 1, а площади относятся, как 3^2 : 1, или 9 : 1.

Эти рассуждения справедливы для конусов любой формы. Если доказательство для круговых конусов кажется вам трудным, представьте себе узкую пирамиду, вырезающую на поверхности сферы прямоугольники. Построение такой пирамиды производится следующим образом. Сначала постройте маленький прямоугольник P_1. Соедините его вершины с точкой D, где находится пробный заряд, и продолжите проведенные линии за D до нового пересечения со сферой, в результате чего получится подобный прямоугольник P_2 другого размера.

примыкающих к первой и также проходящих через точку D. Те же самые рассуждения применимы к этой и ко всем другим парам конусов, которыми теперь можно мысленно заполнить весь шар [1].

Проверка

Если дан закон обратной пропорциональности квадрату расстояния, то можно показать, что «электрическое поле внутри полого заряженного шара отсутствует». При проверке закона обратной пропорциональности квадрату расстояния мы опираемся на обратное утверждение. Если некое утверждение верно, то обратное утверждение не всегда верно, но мы можем легко показать, что в данном случае оно верно. Геометрия конусов дает множители d_1^2 и d_2^2 в числителях приведенных выше выражений; в соответствии с законом обратной пропорциональности квадрату расстояний такие же множители оказываются в знаменателе каждой дроби. Один заряд больше другого, но эта разница компенсируется расстоянием в точно такой же пропорции. Если бы сила взаимодействия зарядов зависела от расстояния по какому-то другому закону и не подчинялась закону обратной пропорциональности квадрату расстояния, то в знаменателе каждой дроби были бы другие множители, и указанная выше компенсация нарушалась. Например, при обратной пропорциональности кубу расстояния действие большего по величине, но более удаленного заряда ослаблялось бы слишком сильно. (Так, если расстояния относятся, как 3 : 1, то площади вырезаемых областей относятся, как 9 : 1, и заряды на них,— как 9 : 1. Обратные квадраты расстояний относятся, как 1 : 9, и это компенсирует разную величину заряда. Обратные кубы расстояний относятся, как 1 : 27, и это нарушило бы компенсацию.)

Таким образом, *если* внутри равномерно заряженной сферы электрическое поле равно нулю, то сила взаимодействия между зарядами должна подчиняться закону обратной пропорциональности квадрату расстояния. Путем дополнительных геометрических построений, поразмыслив как следует над распределением зарядов на проводниках, можно обобщить этот вывод на замкнутую металлическую коробку любой формы. Если коробка отличается по форме от шара, то заряд распределяется на ее поверх-

---

[1] Большинство этих очень узких конусов пересекает поверхность шара наклонно, но это не нарушает рассуждений, поскольку наклон одинаков у обоих оснований конусов P_1 и P_2. Любая хорда окружности или сферы образует равные углы с касательными, проведенными через ее концы.

ности неравномерно. В самом деле, распределение заряда должно быть как раз таким, чтобы электрическое поле внутри всюду было равно нулю. Следовательно, мы располагаем простым и вместе с тем тонким методом проверки закона обратной пропорциональности квадрату расстояния: сообщить большой заряд замкнутой металлической сфере или коробке иной формы и проверить наличие полей. За пределами коробки электроскоп обнаруживает сильное электрическое поле, могут даже вылетать искры. Внутри коробки электрического поля, обусловленного внешними зарядами, нет. Для более надежного обнаружения поля воспользуйтесь двумя маленькими шариками на изолирующих рукоятках. Поместите их незаряженными в исследуемую область. Коснитесь одним шариком другого, затем разведите их и проверьте на каждом наличие заряда (фиг. 87).

Замкнутая металлическая коробка представляет собой идеальный экран для электрических сил (клетка из проволочной сетки почти так же хороша в этом отношении). Если она достаточно велика, то экспериментаторы могут спокойно работать в ней в условиях полной экранировки. Вы, наверное, замечали небольшие металлические экраны такого типа вокруг некоторых деталей вашего радиоприемника.

Приведенное подробное доказательство не нужно считать чем-то столь важным, что требуется помнить всю жизнь. Это характерный пример цепи научных рассуждений, ведущей от предположения о справедливости некоего закона к проведению его решающей проверки.

Алгебра

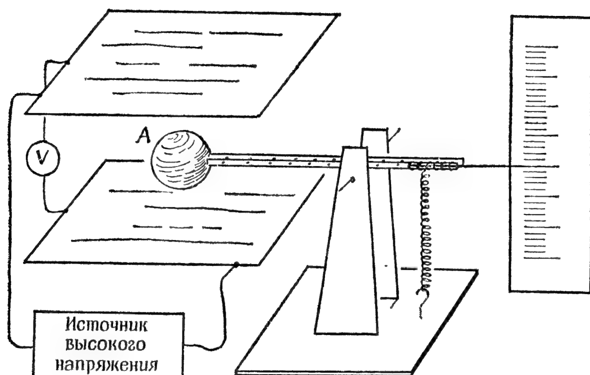
Приведем значительно более краткое и изящное доказательство. Предположим, что сила взаимодействия зарядов подчиняется степенно́му закону вида $F \sim 1/d^n$. Оба узких конуса вырезают на поверхности шара области с зарядами Q_1 и Q_2; $Q_1/Q_2 = d_1^2/d_2^2$, исходя из геометрии и соображений симметрии. Обе области действуют на пробный заряд q с противоположно направленными силами F_1 и F_2, такими, что

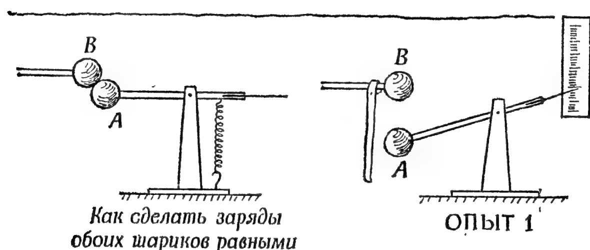
$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{Q_1/d_1^n}{Q_2/d_2^n} = \frac{Q_1/Q_2}{d_2^n/d_1^n}.$$

Если эти силы равны и противоположно направлены, то $F_1/F_2 = 1$ и $(Q_1/Q_2)\,(d_2^n/d_1^n) = 1$. Следовательно, $d_1^n/d_2^n = d_1^2/d_2^2$. Поэтому, чтобы силы взаимно уничтожались, должно быть $n = 2$.

Измерение кулоновской постоянной $\mathcal{B}$

(Этот демонстрационный опыт сам по себе не имеет важного значения для данного курса, но он поможет вам понять опыт Милликена, в котором измеряется заряд электрона.) Мы воспользуемся плексигласовой подставкой с рычагом, применявшейся при проверке закона обратной пропорциональности квадрату расстояния (фиг. 69). Чтобы измерить постоянную $\mathcal{B}$ в выражении $F=\mathcal{B}Q_1Q_2/d^2$, нам нужно знать F, Q_1 и Q_2. Мы используем два одинаковых заряда (Q_1, Q_2) и измеряем силу F взаимодействия зарядов на измеренном расстоянии d между ними. Теперь мы знаем F и d в выражении $F=\mathcal{B}Q^2/d^2$, но не знаем Q. Чтобы найти Q, необходим отдельный опыт. Для такого опыта можно воспользоваться установкой, представляющей собой сильно увеличенную модель прибора Милликена, с помощью которого





Фиг. 89. Измерение постоянной $\mathcal{B}$, входящей в формулу закона Кулона $F=\mathcal{B}Q_1Q_2/d^2$.

он измерял заряд масляной капли (фиг. 89). Поместим шар A, который по-прежнему несет *тот же самый* заряд, в электрическое поле с известной напряженностью и измерим действующую на шар силу. Для этого оставим шар A на рычаге, уберем второй шар и расположим пару металлических пластин так, чтобы одна оказалась над шаром A, а другая под ним. (Верхняя пластина разрезана на две половины для удобства монтажа). Затем присоединим к пластинам зажимы источника высокого напряжения и подключим вольтметр, чтобы измерить напряжение. Далее мы определяем силу, приложенную к A со стороны однородного электрического поля. Зная напряженность поля X *ньютон/кулон* и новое значение силы F *ньютон*, можно вычислить заряд Q в кулонах. Но мы сделали так, чтобы заряды обоих шаров были одинаковы, следовательно, мы знаем *оба* Q в исходном соотношении и можем теперь вычислить $\mathcal{B}$.

Посмотрите, если удастся, этот демонстрационный опыт, он даст общее представление о том, как производятся важные с точки зрения науки измерения. Если вам не представится такой возможности, то проработайте предлагаемую задачу.

Задача 10. Опыт для измерения $\mathcal{B}$

Используя приведенные ниже данные измерений, вычислите:

а) СИЛУ, *приложенную к шару в опыте 2 (в ньютонах),*

б) НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ *между пластинами в опыте 2,*

в) и отсюда ЗАРЯД, *который несет шар* A, *в опыте 2,*

г) СИЛУ *отталкивания в опыте 1 (в ньютонах),*

д) значение $\mathcal{B}$ *(подставив вычисленное значение заряда и измеренное значение силы в опыте 1 в выражение закона обратной пропорциональности квадрату расстояния).*

Данные измерений:

Калибровка рычага. В отсутствие зарядов стрелка рычага показывает нуль. Груз 1 *Г* (=0,001 *кГ*), помещенный на шар A (незаряженный), перемещает стрелку с 0 до 56.

Опыт 1. Равные (неизвестные) заряды Q и Q' отстоят друг от друга на d=0,10 *м*. После приближения второго заряда на указанное расстояние из бесконечности показание стрелки изменилось от 0 до 26.

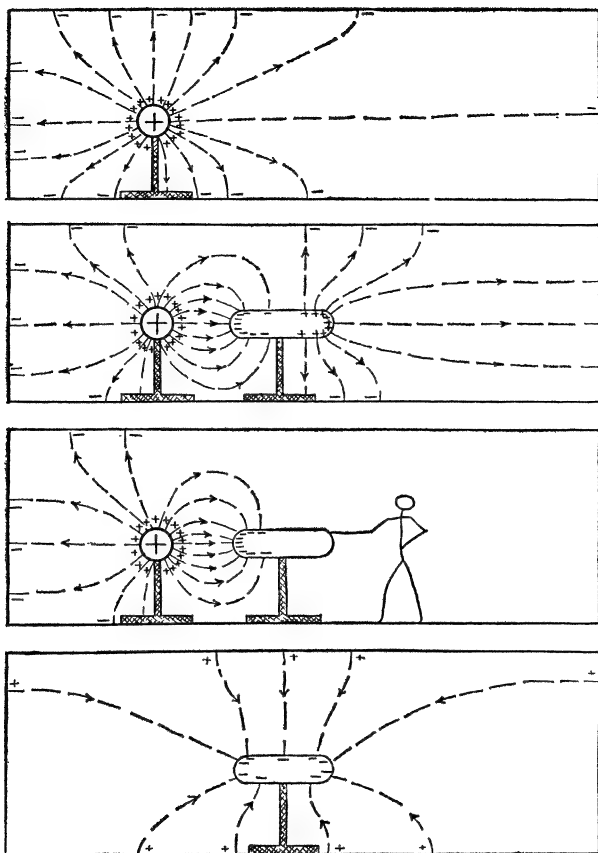
Опыт 2. Заряд Q помещен в поле между двумя пластинами, отстоящими друг от друга на 0,40 *м*. После того как было создано электрическое поле (напряжение между пластинами при этом равнялось 16 000 *в*), стрелка, стоявшая на 0, стала показывать 16.

(Примечание. Поле нужно прикладывать, увеличивая его напряженность постепенно, а пластины следует перемещать так, чтобы шар A оказывался посредине между ними, иначе не удастся избежать ошибок вследствие «зеркальных зарядов», индуцируемых на пластинах зарядом шара.)

Индуцируемые заряды и потенциалы

Заряды легко перемещаются по проводникам. При этом не следует думать, что в металлической проволоке или каком-нибудь другом проводнике появится электрическое поле, если не подключить батарею, которая под-

держивала бы непрерывное движение зарядов. Если в электрическое поле заряженного шара ввести незаряженный металлический стержень с закругленными торцами, в стержне сразу же происходит разделение зарядов и перемещение их вдоль поверхности. Перемещение зарядов будет происходить до



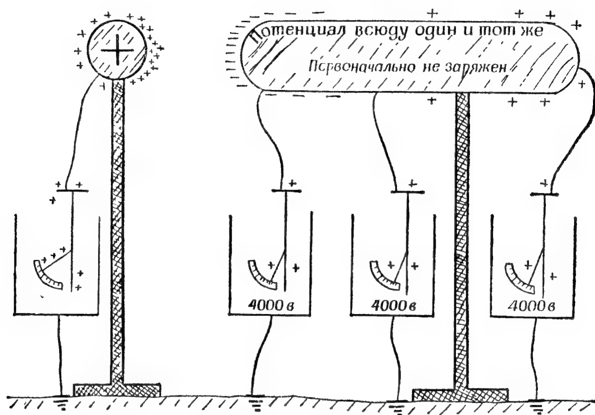
Фиг. 90. Электризация через влияние.

тех пор, пока на всей поверхности стержня и во всех точках внутри него поле не станет равным нулю [1]. Тогда оказывается, что весь металлический

[1] Если не считать поля, силовые линии которого перпендикулярны поверхности металлического стержня; эти силовые линии начинаются на поверхности и идут от нее.

стержень имеет один и тот же потенциал — разность потенциалов между различными частями стержня отсутствует, и ни в одной точке его нет электрического поля. Если бы существовали не равная нулю разность потенциалов между какими-нибудь двумя точками стержня или электрическое поле, то в металле текли бы токи до тех пор, пока разность потенциалов или электрическое поле не обратились бы в нуль.

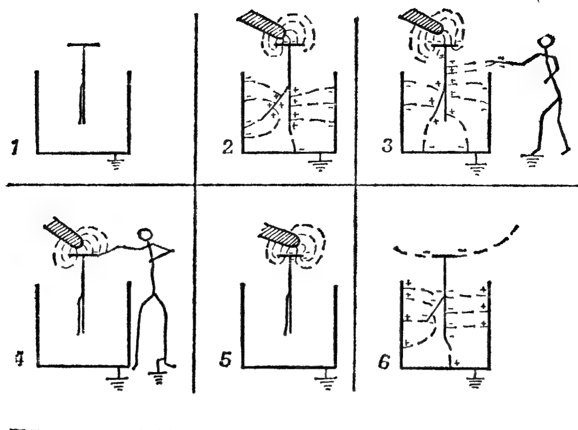
Электрическое поле, равное нулю во всех точках металлического стержня, представляет собой результат сложения внешнего поля заряженного шара и поля, обусловленного зарядами на стержне.



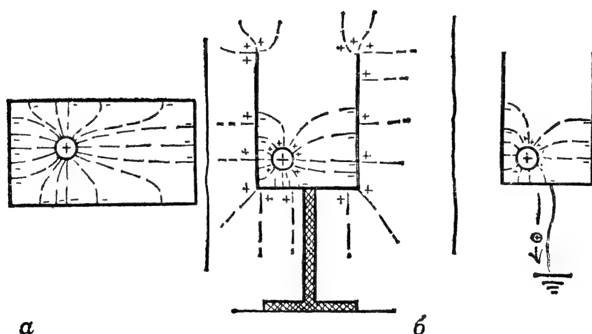
Фиг. 91. Что происходит, когда незаряженный металлический стержень подносят к заряженному шару?

Вольтметры показывают одну и ту же разность потенциалов между любой частью стержня и Землей. Следовательно, все части стержня находятся под одинаковым потенциалом, разность потенциалов между ними равна нулю. Обратите внимание на применение электроскопов в качестве вольтметров, не потребляющих тока.

Как только установится равновесие зарядов — это происходит очень быстро,— силы, приложенные к зарядам со стороны поля, *будут направлены перпендикулярно поверхности металла* и уже не смогут вызвать перемещения зарядов. Посмотрите на рисунки с изображением тел, наэлектризованных через влияние. Вы увидите, что в металлическом теле в одной его части могут находиться положительные заряды, в другой — отрицательные, в некоторых частях тело может быть не заряжено. Тем не менее все точки тела должны иметь один и тот же потенциал (т. е. разность потенциалов между любой точкой тела и землей должна быть одна и та же). Может показаться странным, что разность потенциалов между любыми частями равна нулю, хотя одна часть тела заряжена положительно, а другая — отрицательно. Но нужно помнить, что эти разнородные области, несущие положительные и отрицательные заряды и совсем незаряженные, существуют только из-за соседства других заряженных тел. Потенциал обусловлен совместным действием зарядов соседних тел и рассматриваемого тела.



Фиг. 92. Стадии электризации электроскопа через влияние.
Заряженный стеклянный стержень индуцирует заряды на листочке и пр. Заряды, находящиеся на листочке, индуцируют заряды на металлическом корпусе, а поскольку корпус имеет соединение с землей, «одноименные» (отрицательные) заряды уходят с корпуса на землю.



Фиг. 93. *а* — заряженное тело помещено в замкнутую металлическую коробку. Предполагается, что коробка соединена с землей, поэтому заряды на наружной поверхности не показаны. *б* — заряженный шар помещен в открытый металлический стакан
Вопрос: какова будет картина поля в каждом из трех показанных выше случаев, если шар смещен в боковом направлении и едва касается стенок коробки (стакана)?

Электростатическая индукция — интерпретация с помощью силовых линий

На фиг. 90 явление электростатической индукции иллюстрируется с помощью силовых линий. На фиг. 92 показано заряжение электроскопа через влияние. Это окончательные равновесные карты силовых линий.

Фарадеев цилиндр

Если тело с зарядом $+Q$ поместить внутрь замкнутой металлической полости, то все силовые линии, идущие от $+Q$, должны кончаться на внутренней поверхности полости, на отрицательных зарядах, общая величина которых равна $-Q$. (Если бы силовые линии продолжались внутрь металла или проходили сквозь стенки полости, то существовали бы электрические поля и силы; они вызвали бы токи в металле, которые текли бы вплоть до установления равновесия зарядов.)

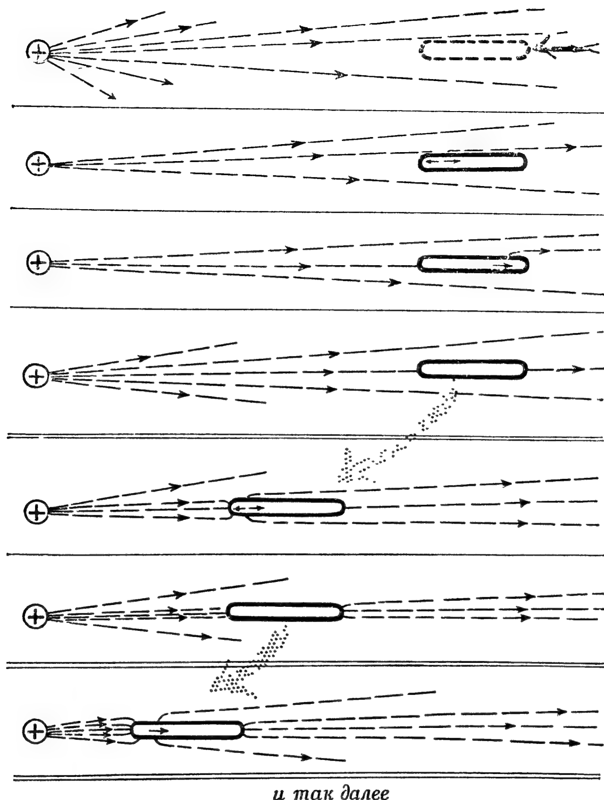
Высокий полый металлический цилиндр с открытым верхом ведет себя почти как замкнутая полость. Заряд $+Q$, внесенный внутрь цилиндра, индуцирует на внутренней поверхности цилиндра заряд $-Q$. На наружной поверхности распределяется равный ему по величине и противоположный по знаку заряд $+Q$, который уходит в землю, если цилиндр не изолирован.

Силовые линии в движении. Мгновенные токи

(См. «моментальные снимки» на фиг. 94 и 95.)

Силовые линии электрического поля вокруг изолированного заряженного шара представляют собой расходящиеся от шара радиальные прямые, идущие к зарядам противоположного знака, которые располагаются на удаленных стенах, потолке, земле. При приближении к шару металлического стержня последний, если можно так сказать, обрывает некоторые силовые линии. Оборванные силовые линии своими концами «прикрепляются» к зарядам, расположенным на поверхности стержня, и тянут их вдоль поверхности. Так, если шар заряжен положительно, то идущие от него оборванные силовые линии захватывают на стержне отрицательные заряды и увлекают их в сторону шара, а другие концы оборванных линий захватывают положительные заряды и тянут их в направлении от шара. По мере приближения стержня к шару разрывается все большее число линий, которые в соответствии с нашими представлениями разделяют в стержне бóльшие по величине индуцированные заряды.

Прикосновением пальца можно укоротить силовые линии, натянутые между металлическим стержнем и стенами. Правда, в переходный момент силовые линии могут даже удлиниться (если силовые линии идут к отрицательным зарядам на стоящем поблизости столе, то они, возможно, должны будут удлиниться, когда будут проходить через плечо экспериментатора). Но в конечном счете они сократятся до полного исчезновения, что на самом деле и происходит. Перед тем как вы поднесли палец, силовые линии были протянуты от положительных зарядов на металлическом стержне к отрицательным зарядам на полу и на стенах. Когда вы коснетесь стержня пальцем, один конец силовой линии начинает тянуться к другому или оба конца — друг к другу (через палец, руку, тело, пол),

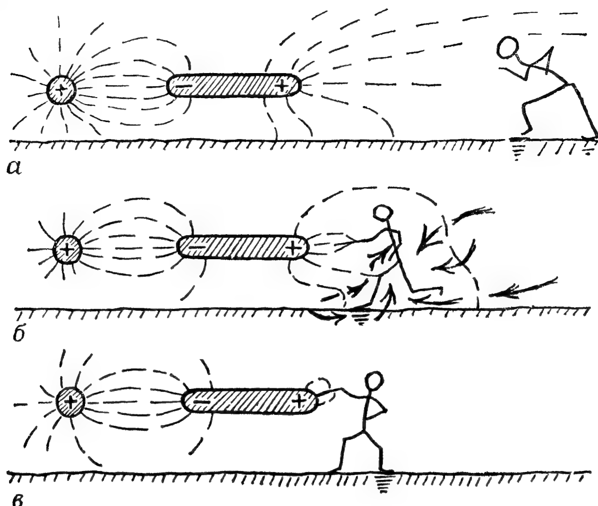


Фиг. 94. Движущиеся силовые линии.

Металлический стержень при приближении к заряженному шару нарушает картину электрического поля вокруг шара. Здесь показаны «моментальные снимки» конфигурации поля, на которых видны «оборванные» силовые линии в движении. Движущиеся концы силовых линий тянут заряды, заставляя их принять новое равновесное положение, и при этом текут токи. Силовые линии могут не быть перпендикулярны поверхности металлического стержня. Они должны быть наклонены к ней, должны иметь составляющую вдоль поверхности, в направлении которой на заряды действует сила. По мере приближения стержня к заряженному шару все новые силовые линии обрываются, и концы их тянутся вдоль стержня.

«Моментальные снимки» показывают стадии, длящиеся лишь очень короткое время. Движущиеся концы силовых линий поля — это движущиеся заряды, перемещение которых представляет собой кратковременный ток. Эти токи действительно существуют, но скоро исчезают,— как только и экспериментатор и металлический стержень приобретают один и тот же потенциал (потенциал земли). Тогда в отсутствие разности потенциалов токов не будет.

пока концы силовой линии не встретятся и не произойдет их нейтрализация. (В металлах перемещаются отрицательные концы силовых линий и тянут за собой электроны.)

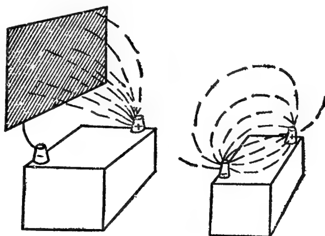


Фиг. 95. Прикоснувшись к стержню пальцем, индуцированному заряду дают «уйти на землю».

а — по мере приближения человека он отрывает все новые и новые силовые линии; б — «моментальный снимок»: силовые линии сокращаются, концы их подтягиваются, подводя заряды к пальцу человека; в — еще один «моментальный снимок»: последняя из исчезающих силовых линий поля.

Батарея

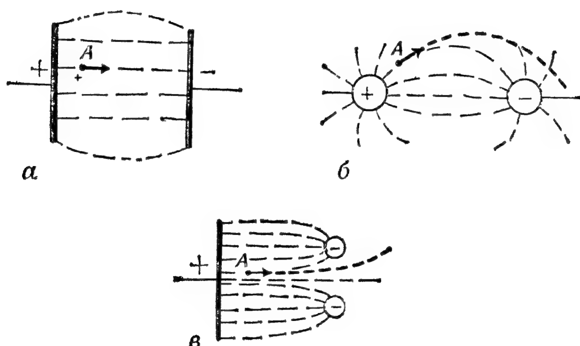
Между зажимами батареи, не включенной в цепь, существует электрическое поле. Соедините зажимы проволокой, и поле будет стремиться исчезнуть; силовые линии поля, «стягивающие» зажимы батареи, будут тянуть заряды вдоль проволоки, создавая тем самым ток, который можно рассматривать как проявление непрекращающегося стремления избавиться от поля.



Фиг. 96. Батарея обладает собственным электрическим полем.

Силовые линии и движущиеся заряженные частицы

Силовые линии электрического поля указывают в каждой точке направление силы, действующей на малый пробный положительный заряд. Предположим, мы вносим в электрическое поле крошечную заряженную частицу. Будет ли она двигаться вдоль силовой линии? Оказывается, только вначале. Дело в том, что частица перемещается всегда в направлении ее *результирующего количества движения*. В любой точке частица при своем движении испытывает действие силы, направленной по касательной к силовой линии, и *количество движения* частицы *в этом направлении увеличивается*. Это приращение количества движения складывается с предшествующим количеством движения, которое может иметь другое направление, если силовые линии искривлены. Электроны, например, приобретают ускорение вдоль силовых линий электрического поля. Однако после того, как электроны начали двигаться, они не могут точно следовать направлению искривленных силовых линий, а уносятся в направлении вектора количества движения.



Фиг. 97. Движение маленькой положительно заряженной частицы, обладающей массой, в электрическом поле.

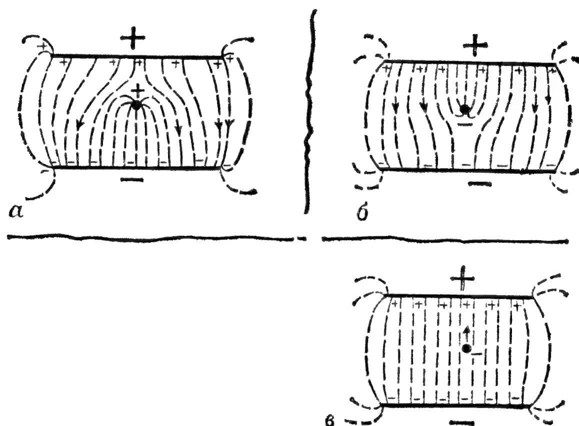
В каждом случае частица начинает двигаться из состояния покоя в точке *A*. Частица движется с ускорением, поскольку со стороны электрического поля к ней приложена сила, действующая на ее положительный заряд. Траектория частицы показана жирной пунктирной линией. (Отрицательная частица, например электрон, совершала бы такое движение при противоположном направлении поля.)

На фигуре *в* показана частица в поле между положительной пластиной и двумя отрицательно заряженными стержнями, разделенными зазором. Траектория частицы не может сильно искривиться, и она проносится между стержнями.

Так электрические поля заставляют двигаться электроны: увлекают их от катода к аноду двухэлектродной радиолампы — диода, управляют потоком электронов в усилительной лампе — триоде, ускоряют пучок электронов в так называемой электронной пушке, создают периодическое горизонтальное движение электронного луча в пределах некоторого угла в осциллографической или телевизионной трубке. Попытайтесь представить себе картину электрических полей, которые увлекают электроны и управляют их движением в описываемых ниже приборах.

Электроны в электрическом поле

Если поместить в электрическое поле заряженную частицу, то на ней соберется несколько силовых линий поля, которые начнут тянуть частицу, как показано на фиг. 98, *а*. Электроны, обладаю-



Фиг. 98. Заряженное тело малых размеров в электрическом поле.
а и *б* — результирующее поле; *в* — заряд тела слишком мал, чтобы исказить однородное поле. Фигура *в* изображает также внешнее поле, которое действует на заряд тела во всех случаях независимо от того, велик заряд или мал.
Стрелка указывает направление силы, действующей на отрицательный заряд.

щие *отрицательным* зарядом, движутся под действием силы, направленной *противоположно* полю [1], как показано на фиг. 98, *б*.

---

[1] Такое направление силы, действующей на электроны, является следствием первоначального выбора знаков «+» и «—», сделанного учеными. Стои-

Разумеется, электрическое поле, действующее на электрон (фиг. 98, *в*), не претерпевает изменений из-за присутствия электрона, который не искажает общей картины поля. Стрелка на фиг. 98,*в* указывает направление силы, приложенной к отрицательному электрону, находящемуся в электрическом поле.

Испускание электронов накаленными металлами

Опыты с простыми радиолампами показывают, что раскаленная нить накала служит источником некоего переносчика тока, способного поддерживать ток *в одном направлении* — от нити накала к аноду. Это имеет место даже в том случае, если в лампе создан самый высокий вакуум — идеальный изолятор, разделяю-

---

ло им выбрать знаки по-другому, и стрелки, обозначающие направление электрического поля (и тока на схемах), указывали бы направление движения электронов. Теперь менять первоначальный выбор слишком поздно: развитие электротехники утвердило его в качестве всеобщего соглашения. И студенты, которые способны разобраться в электрических цепях и полях, смогут запомнить, что на электроны действует сила, направленная *противоположно* стрелкам, указывающим от «+» к «—». Правда, не всегда движутся отрицательные электроны. В жидких растворах и в газах есть положительные и

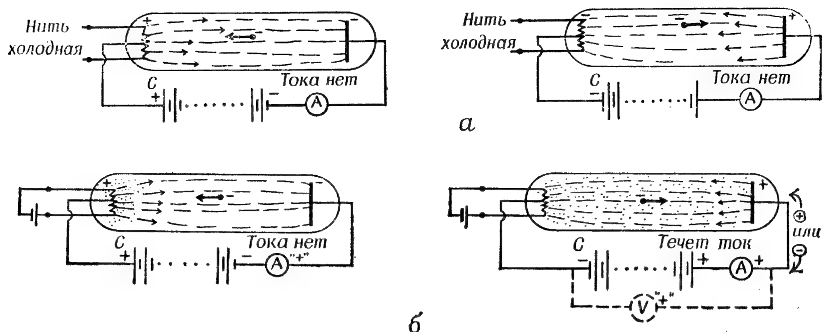


Фиг. 99. Электрон в электрическом поле.

Силовые линии электрического поля снабжают стрелками, указывающими направление силы, действующей со стороны поля на малый положительный пробный заряд. Электроны обладают отрицательным зарядом, поэтому со стороны поля на них действует сила в строго противоположном направлении.

отрицательные носители тока, движутся и те, и другие, разумеется, в противоположных направлениях. Существуют, кроме того, положительные электроны, которые движутся в направлении стрелок (пока не исчезают в результате гибельного столкновения с отрицательными электронами). Наконец, в некоторых кристаллических полупроводниках мы находим так называемые «дырки» — места в кристалле, не занятые электронами. Электрон из другого места кристалла может пойти по направлению к «дырке» и заполнить «пустое место», оставив пустое место там, где он ранее находился. Таким образом, «дырки» могут перемещаться так, как будто перемещаются положительные заряды.

щий нить накала и анод. Поскольку ток есть движение зарядов, в лампе должны появляться какие-то носители тока, обладающие электрическим зарядом. При холодной нити никакого тока нет: эффект прохождения тока наблюдается только, когда нить раска-

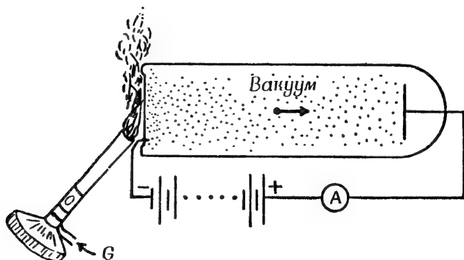


Фиг. 100. Простейшая радиолампа.

а — когда нить накала холодная, тока нет (если только к лампе не приложена очень большая разность потенциалов, под действием которой вырываются электроны из «холодных» атомов).

б — при таком включении батареи, как показывает вольтметр, анод положителен, а катод отрицателен. Миллиамперметр показывает, что через лампу течет положительный ток в направлении ← (или отрицательный ток в направлении →).

лена. Таким образом, мы приходим к предположению, что носители тока испускаются нитью. Миллиамперметр и вольтметр говорят нам, что если эти носители перемещаются от нити накала к аноду, то они должны обладать *отрицательным* зарядом. Ток через

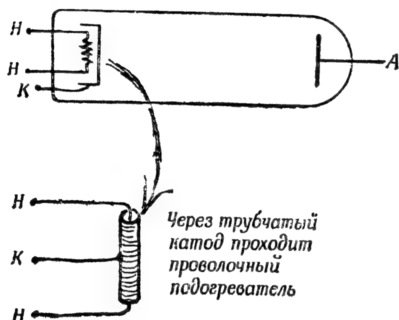


Фиг. 101. Если окошко из тонкого листового вольфрама, впаянное в торец стеклянной трубки, достаточно сильно нагреть пламенем газовой горелки, то через трубку под действием подходящего электрического поля будет проходить поток электронов.

лампу условно рассматривается как ток *положительных зарядов, текущий от анода к нити накала*, направление этого тока считается положительным; говорят также об отрицательном токе в направлении от нити накала к аноду. Разность потенциалов, обусловли-

бающая этот ток, приложена так, что анод положителен, а нить накала отрицательна. Поэтому *электрическое поле притягивает отрицательные заряды от нити накала к аноду*. Если изменить направление приложенной разности потенциалов, то никакого тока не будет, носители будут испытывать действие силы, направленной в сторону нити накала, и не смогут двигаться. Мы называем эти носители тока *отрицательными электронами* или просто *электронами*.

По-видимому, в раскаленной металлической нити накала есть свободные электроны, которые движутся с большой скоростью и



Фиг. 102. Радиолампа с отдельными катодом и подогревателем.

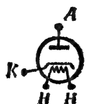
могут вылетать за пределы нити, подобно молекулам, испаряющимся из жидкости. Электроны способны вырваться из металла только в том случае, если соседние атомы смогут сообщить им достаточное количество добавочной энергии, когда металл достаточно нагрет. Чтобы заставить металл испускать электроны, необязательно нагревать его *электрическим током*. Полоска листового вольфрама, если нагреть ее в пламени небольшой газовой горелки, будет точно так же испускать электроны. Во многих современных радиолампах применяется так называемый косвенный подогрев. В этом случае накаленный поверхностный слой, который испускает электроны,— *катод* [1] разогревается маленьким электрическим подогревателем, находящимся в непосредственной близости к нему. Обычно катод имеет вид трубки, внутри которой проходит проволочный подогреватель. Катод часто покрывают слоем осо-

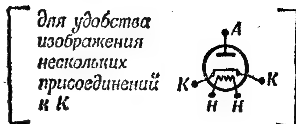
---

[1] Катод — это давнее название отрицательного электрода в электролитической ванне. Положительный электрод, через который, как об этом говорилось, в раствор входит ток положительного направления, был назван анодом. Положительный электрод в радиолампах или электрод с отверстием в электронной пушке называется анодом.

бого состава из смеси окислов, благодаря которому электроны интенсивно испаряются при сравнительно низкой температуре.

Фиг. 103. Схематическое изображение двухэлектродной радиолампы.



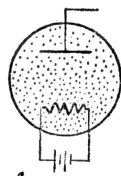


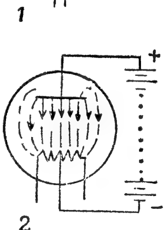
Мы будем в дальнейшем изображать радиолампы с отдельным катодом K и подогревателем HH.

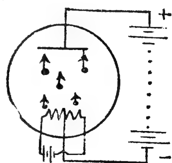
РАДИОЛАМПЫ

Диод и его применение для выпрямления тока

Электроны, испаряющиеся из накаленного катода, движутся под действием электрического поля в пространстве между катодом и анодом. Они ускоряются и налетают на анод, передавая ему свою







Фиг. 104. Простейшая радиолампа (диод).

Внутри баллона создан высокий вакуум.

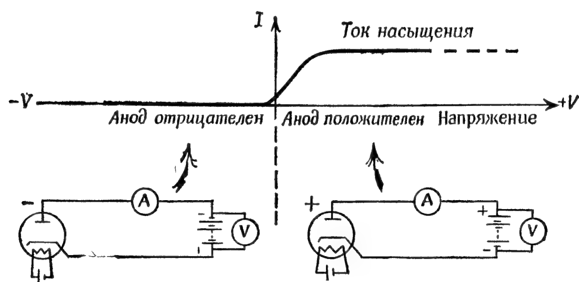
1 — если нагреть вольфрамовую нить накала до белого каления, то электроны интенсивно испаряются из нее и образуют внутри баллона своего рода облако. Электронное облако, если оно сохраняется, создает тормозящее электрическое поле, которое противодействует дальнейшему испарению электронов.

2 — батарея, присоединенная к нити накала и к аноду, создает между ними электрическое поле. Поле, показанное на фигуре, заставляло бы положительный заряд двигаться от анода к нити накала; в действительности под действием этого поля отрицательный заряд перемещается от нити накала к аноду.

3 — при накаленной нити и приложенном поле поток электронов движется через лампу к аноду. Если изменить направление поля на обратное, то электроны отталкиваются назад, и тока в лампе нет. Если увеличивать приложенное поле, то поток электронов достигает максимума, когда все электроны, испаряющиеся с катода, попадают на анод.

кинетическую энергию и усиливая хаотические колебания атомов материала анода, в результате чего анод нагревается.

Лампа, в которой создан хороший вакуум, наполняется облаком электронов, подобно молекулам насыщенного пара. Если между катодом и анодом лампы приложить электрическое поле соответствующей величины и направления, то электронное облако будет перемещаться к аноду, и пойдет ток. Облако электронов ослабляет поле; некоторые электроны отталкиваются отрицательным зарядом облака назад, к катоду, поэтому ток через лампу мал. Только приложив очень большое напряжение, мы получим макси-



Фиг. 105. «Характеристика» диода: график зависимости тока от напряжения.

Обратите внимание на то, что I — это отрицательный ток, идущий от катода к аноду.

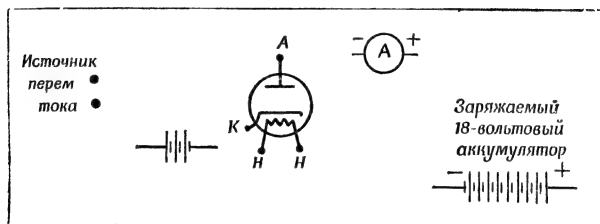
мальный ток, когда все электроны проносятся в направлении анода по мере их «испарения». Если теперь приложить еще большее напряжение, то увеличить ток уже не удастся. Этот неизменный максимальный ток называется *током насыщения*. (Смысл слова «насыщение» здесь, к сожалению, расходится со значением этого слова в выражении «насыщенный пар». Понятие «ток насыщения» вызывает представление о том, как молекулы пара уносятся сильным ветром сразу же после испарения — мечта хозяйки, которой приходится сушить белье.)

Электроны в диоде могут пересекать пространство между катодом и анодом только в одном направлении — от катода к аноду. Таким образом, лампа действует как вентиль, легко пропуская ток, когда анод положителен, и не пропуская тока при обратной разности потенциалов, приложенной к электродам лампы. Это свойство диода используют в тех случаях, когда требуется получить прямой (постоянный по направлению) ток от источника пере-

менного тока. Сеть коммунального электроснабжения дает переменный ток, пригодный для освещения и работы нагревательных приборов и специально сконструированных электромоторов, но совершенно непригодный для зарядки аккумуляторов или высоковольтного питания усилительных ламп в радиоприемнике.

Задача 11. Зарядка аккумуляторов

На фиг. 106 показан диод, у которого катод подогревается током от 6-вольтового аккумулятора. Диод используется для зарядки 18-вольтовой аккумуляторной батареи (три автомобильных аккумулятора, соединенных последовательно) от источника переменного тока. Срисуйте все изображенные на



Фиг. 106. К задаче 11.

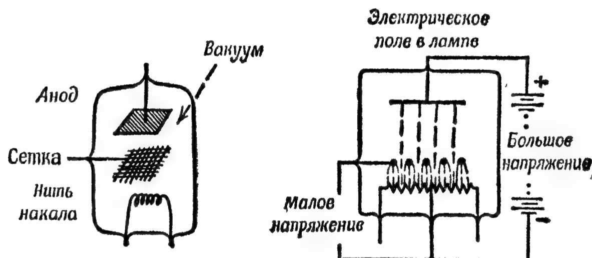
фигуре приборы и дополните схему необходимыми для ее работы соединениями. Примечание. Чтобы зарядить аккумулятор, ток (имеется в виду положительный ток, совпадающий по направлению с условным током положительных зарядов) должен входить в его положительный зажим, проходить через аккумулятор и выходить из отрицательного зажима; если рассматривать ток отрицательных зарядов (отрицательный ток), то он, разумеется, должен проходить в противоположном направлении.

Схему выпрямления тока, элементы которой показаны на фиг. 106, можно усовершенствовать, используя два диода. Если приложить между катодом и анодом диода переменное напряжение, то в цепи появятся импульсы тока одного направления (по одному импульсу на каждый период), чередующиеся с интервалами, когда ток отсутствует. Схема выпрямления, в которой используются два диода, дает вдвое больше импульсов тока, два за каждый период. Пульсирующим током, который дают обе схемы, можно заряжать аккумулятор. Можно сгладить этот ток с помощью дросселя и конденсатора и получить постоянное по амплитуде напряжение, необходимое для работы радиоламп. Описанное получение постоянного тока из переменного, как уже говорилось, носит назва-

ние *выпрямления*, поскольку ток после выпрямления не меняет своего направления и течет лишь в прямом направлении. Обязательно посмотрите, как происходит выпрямление переменного тока, на экране осциллографа.

Трехэлектродная лампа

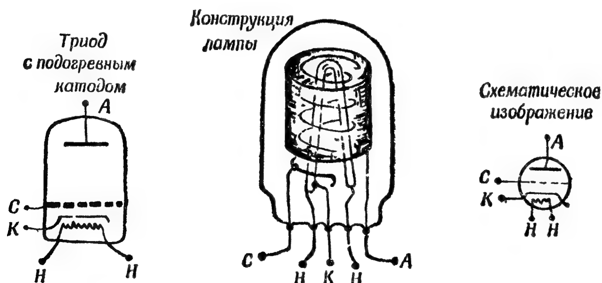
Простой диод можно превратить в еще более полезный электровакуумный прибор, если ввести в него третий дополнительный электрод с отверстиями — сетку, которую располагают вблизи



Фиг. 107. Триод.

Схематическое устройство трехэлектродной радиолампы — триода, имеющей нить накала, анод и сетку. Небольшая, обычно тормозящая разность потенциалов между нитью накала и сеткой сильно влияет на поток электронов, вылетающих из нити, давая возможность легко управлять им. Многие электроны проходят сквозь ячейки сетки, и за пределами сетки ускоряющее поле увлекает их к аноду.

катода, чтобы усиливать или ослаблять поток электронов, направленный к аноду. Это трехэлектродная лампа, или триод,— основ-



Фиг. 108. Триод.

ная лампа, используемая в радиоприемниках; она может служить для усиления электрических напряжений и токов и выпрямления тока. (Есть еще более сложные радиолампы; они содержат, на-

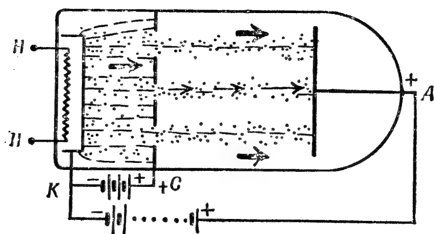
пример, дополнительные сетки для захвата рассеянных электронов, но это, так сказать, украшения к основной лампе-триоду. Кстати, те же самые задачи, притом с меньшими хлопотами, могут быть решены с помощью транзистора.)

Триод как усилитель

Между катодом и сеткой прикладывают небольшое напряжение, «сигнал», который нужно усилить. Анод поддерживается под высоким напряжением неизменной величины по отношению к катоду. Это напряжение создает сильное электрическое поле за пределами сетки, стремящееся оттянуть электроны к аноду. В триоде небольшое изменение напряжения между сеткой и катодом очень сильно влияет на поток электронов, летящих к аноду: на этом основано *усилительное* действие лампы.

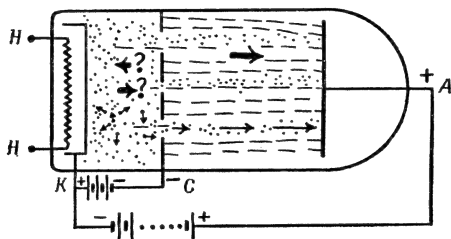
Если сетка оказывается положительной по отношению к катоду, то электроны сразу же попадают в ускоряющее поле. Сетка притягивает электроны из облака, окружающего катод, они устремляются к сетке, приобретая дополнительное количество движения. При этом траектории большей части электронов не совпадают с искривленными силовыми линиями поля, идущими к сетке, и электроны проносятся сквозь сетку. За пределами сетки электроны захватываются ускоряющим полем и мчатся к аноду. Триод становится подобным диоду в режиме насыщения. Этот тяжелый режим, когда сетка положительна, используется редко: обычно сетка находится при отрицательном потенциале по отношению к катоду.

Если сетка отрицательна, то картина получается иной; этот режим работы лампы имеет гораздо большее практическое значение. Отрицательная сетка сдерживает электронное облако. Некоторые электроны просачиваются сквозь ячейки сетки и устремляются к аноду под действием сильного поля за пределами сетки. Если же сетка лишь слегка отрицательна по отношению к катоду, то часть силовых линий поля, идущих от анода, проходит через сетку и закрепляется на электронах. В этом случае электроны, испытывая небольшое притяжение, медленно перемещаются от катода к сетке, а пройдя сквозь сетку, устремляются к аноду. *Поток электронов в промежутке катод — сетка сильно зависит от разности потенциалов между сеткой и катодом, и с помощью нее очень легко управлять этим потоком. Малые изменения напряжения между сеткой и катодом сильно влияют на поток электронов, покидающих катод, и тем самым на анодный ток.* Это очень удоб-

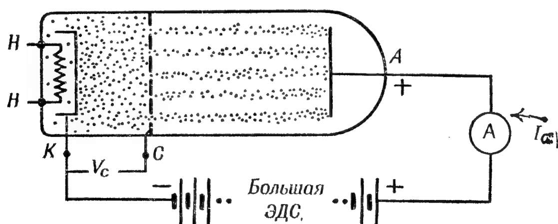


Фиг. 109. Электрическое поле в триоде при положительной сетке (ненормальный режим).

Сквозь сетку проходит мощный поток электронов, стремительно уносимых полем к аноду; некоторые электроны задерживаются сеткой C. Тонкие стрелки показывают скорости электронов. Толстые стрелки указывают направление силы, действующей на отрицательные электроны со стороны поля.



Фиг. 110. Электрическое поле в триоде при отрицательной сетке (обычный режим работы лампы).

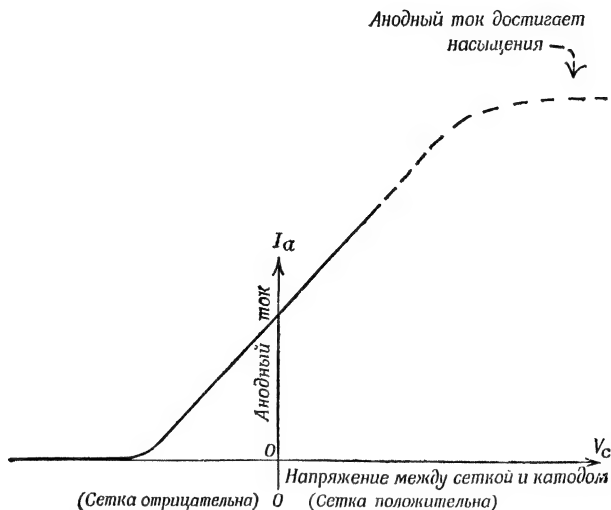


Фиг. 111. Триод в действии.

Электроны, испускаемые накаленным катодом, образуют облако в области между катодом и сеткой. Электроны, которым удается пройти сквозь ячейки сетки, движутся под действием сильного поля к аноду. Разность потенциалов между сеткой и катодом управляет потоком электронов.

ный способ управлять потоком электронов с помощью малого напряжения. Чтобы достичь такого же изменения потока электронов путем изменения напряжения между катодом и анодом, это последнее пришлось бы изменить много больше. Иначе говоря, триод позволяет увеличивать (усиливать) напряжение.

Более того, триод усиливает мощность. К сетке и от нее текут лишь очень малые токи: бо́льшая часть электронов направляется к аноду. Таким образом, в цепь сетки триода под действием малого



Фиг. 112. «Характеристика» триода.
Напряжение анода поддерживается при снятии этой «характеристики» постоянным.

напряжения поступает чрезвычайно малый ток, в то время как в анодной цепи появляется гораздо больший ток, который, протекая через достаточно большое сопротивление, вызывает большие изменения напряжения. Другими словами, триод отдает в анодную цепь значительно бо́льшую мощность и вызывает значительно бо́льшие изменения мощности, чем подводятся к сетке. Триод напоминает в этом отношении современную машину-автомат, в которой с помощью легкого нажатия кнопки управляют огромными количествами энергии. В управлении потоком энергии состоит основная функция триода как усилителя. Дополнительная

энергия поступает от источника высокого постоянного напряжения (это может быть батарея или сетевой выпрямитель), который включают в анодную цепь.

Триоды в радиоприемниках

В усилителе радиоприемника приходящие радиосигналы создают малые напряжения между катодом и сеткой триода [1]. Возникающие в результате этого изменения потока электронов, направляющихся к аноду, вызывают большие изменения напряжения между концами так называемого «сопротивления нагрузки», включенного в анодную цепь, с которого «снимают» эти изменения напряжения. Напряжение на сопротивлении нагрузки можно приложить между сеткой и катодом еще одного триода для дальнейшего усиления и в конечном счете заставить работать от этого напряжения динамик.

Чтобы динамик приемника мог работать от радиосигналов, их нужно не только усилить, но и выпрямить — пропустить через какое-то устройство, дающее на выходе ток одного направления. Необходимость выпрямления радиосигналов не очевидна; почему их приходится выпрямлять, будет рассказано в гл. 41.

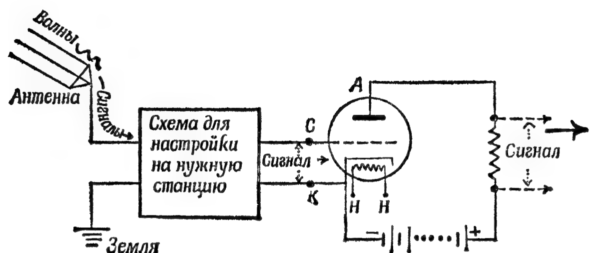
Триод может работать как выпрямитель у нижнего излома своей характеристики — графика зависимости тока от напряжения, где характеристика загибается, приближаясь к горизонтальной оси. Однако, несмотря на возможность использовать одну и ту же лампу как для выпрямления, так и для усиления, лучше разделить обе эти задачи и применять разные лампы.

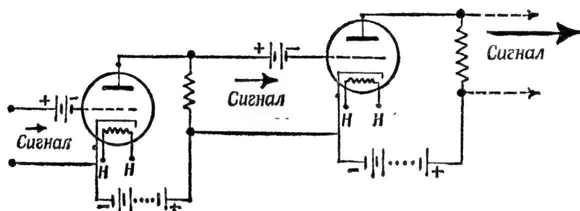
Триоды сочетают усилительные свойства с достоинствами диодов. Диоды находят применение в «источниках питания» для получения постоянного тока из переменного; эти источники используются вместо батарей. Обеим лампам угрожает конкуренция со стороны новых приборов — маленьких «транзисторов»,

---

[1] Для работы триода нужны две вспомогательные батареи или два других источника постоянного напряжения. Чтобы изменения напряжения на сетке достаточно эффективно влияли на поток электронов, сетка должна быть слегка отрицательной по отношению к катоду. Этого добиваются включением небольшой батареи последовательно с источником изменяющегося сигнала или применением равнозначной схемы, которая позволяет обойтись без батареи. Чтобы создать поле, увлекающее электроны к аноду, необходимо высокое напряжение; источником этого напряжения служит специальная батарея (так называемая «анодная батарея») или выпрямитель, работающий от сети переменного тока.

в которых нет накаливаемых элементов. В транзисторе в кусочке полупроводникового кристалла создается однонаправленное управляемое противодействие движению электронов на стыках полупроводниковых материалов двух типов в одном и том же кристалле.





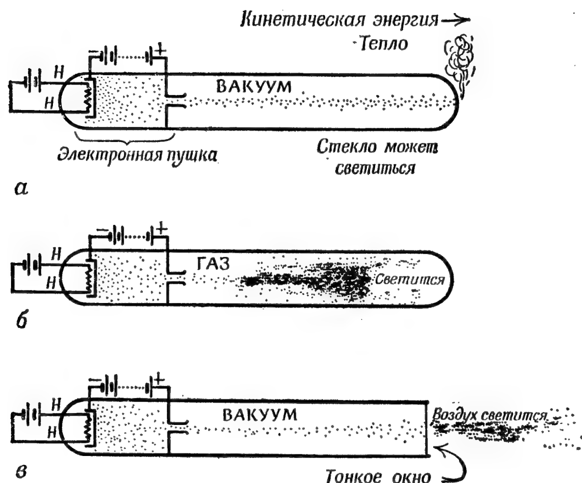
Фиг. 113. Усиление радиосигналов.
а — усиление на одном триоде; б — две ступени усиления.

Электронная пушка

Тут вы оказываетесь похожим на человека, который всю жизнь говорил прозой, сам того не зная. Вы, должно быть, имели дело с электронной пушкой, не зная об этом. Электроны, испаряющиеся из накаленного катода, ускоряются под действием электрического поля и бомбардируют анод. Если в аноде проделать отверстия, то через каждое отверстие будет выбрасываться поток электронов. Электроны продолжают свой путь, пока не ударятся о стенки баллона или, если в лампе есть остатки газа, пока не потеряют энергию при столкновениях с молекулами газа. Если электроны обладают достаточно большой энергией, то они могут пройти даже

сквозь тонкие стеклянные или металлические стенки баллона и вылететь в атмосферу, где вскоре тормозятся.

Электронная пушка, предназначенная для получения узкого пучка электронов, обладает некоторыми дополнительными особенностями устройства. Анод имеет лишь одно отверстие, добавлены сетки для управления фокусировкой и интенсивностью пучка. Благодаря фокусировке электроны выходят очень узким пучком или собираются в маленькое пятнышко к моменту достижения



Фиг. 114. Электронные пушки.

а — трубка, в которой создан вакуум; *б* — трубка с небольшим количеством газа; *в* — трубка, в которой создан вакуум; электроны выходят наружу через очень тонкое металлическое окно в торце трубки.

мишени, если пучок при выходе расходящийся. Чтобы добиться этого, создают небольшие дополнительные электрические поля. Проблемы, связанные с получением полей нужной конфигурации, составляют новую область техники — «электронную оптику», в которой пользуются плодотворной аналогией между классической оптикой и механикой электронов.

Интенсивностью пучка электронов управляют посредством отрицательно заряженной сетки, которая расположена вблизи нити накала и создает поле, тормозящее поток электронов. Сетка таким образом управляет числом электронов, которые достигают ускоряющего поля. Если сетка находится под большим отрица-

тельным потенциалом, она отталкивает все электроны обратно к нити накала. Если сетка слегка отрицательна по отношению к катоду, то она позволяет осуществить эффективное управление потоком электронов. При положительной сетке плотность потока максимальна, и пушкой уже нельзя управлять. На схемах мы будем изображать такие электронные пушки без дополнительных сеток или анодов.

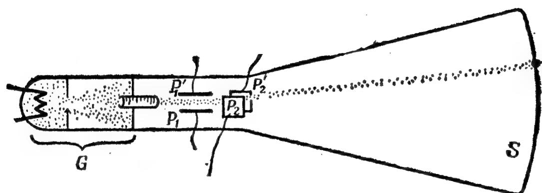
В ранний период изучения электронов, на пороге 1900 г., таких обильных источников потока электронов не было. Вместо них Дж. Дж. Томсону и другим исследователям пришлось пользоваться электронами, которые были вырваны из металлов или выбиты из молекул разреженного газа в разрядных трубках, а затем ускорены в трубке под действием разности потенциалов в несколько тысяч вольт. Это давало слабый пучок электронов с неодинаковой кинетической энергией.

Осциллографы

Пучок электронов, вылетающих из электронной пушки, если его путь проходит через вакуум и он не встречает больше электрических полей, имеет вид прямой линии, а скорость электронов не меняется. Налетая на торцевую стенку стеклянного баллона, электроны останавливаются, их кинетическая энергия переходит в тепло, за исключением тех редких случаев, когда вместо этого при торможении электрона испускается фотон (квант) рентгеновского излучения. Если покрыть стекло слоем специального флуоресцирующего состава, то в том месте, куда ударяются электроны, появится светящееся пятно. Налетающие электроны вызывают свечение не в результате нагрева, а благодаря возбуждению электронов в атомах покрытия. Этим светящимся пятном можно чертить графики и рисовать изображения. Электрические поля отклоняют пучок справа налево и слева направо в горизонтальном направлении или вверх и вниз, заставляя его вычерчивать графики или рисовать изображения на телевизионном экране. Электроны в пучке движутся очень быстро и обладают ничтожно малой массой, поэтому пучок невероятно быстро и легко реагирует на действие отклоняющих полей.

На фиг. 115 показана трубка электронно-лучевого осциллографа — предшественница телевизионных трубок. Электроны вылетают узким пучком из пушки G и налетают на экран S, расположенный на противоположном конце трубки. Экран S покрыт слоем вещества, которое светится при бомбардировке электронами.

Пучок фокусируется пушкой в маленькое светящееся пятно на экране. Проходя через отклоняющее электрическое поле, созданное между пластинами P_1 и P'_1, пучок смещается вверх или вниз, так как электроны получают некоторое количество движения в вертикальном направлении. Имеется еще одна пара пластин, P_2 и P'_2, между которыми создают поле для отклонения пучка в горизонтальной плоскости. Если к пластинам P_1 и P'_1 подключить батарею (с э. д. с., скажем, 45 *в*) так, чтобы верхняя пластина стала положительной, то пучок отклонится вверх, и пятно будет



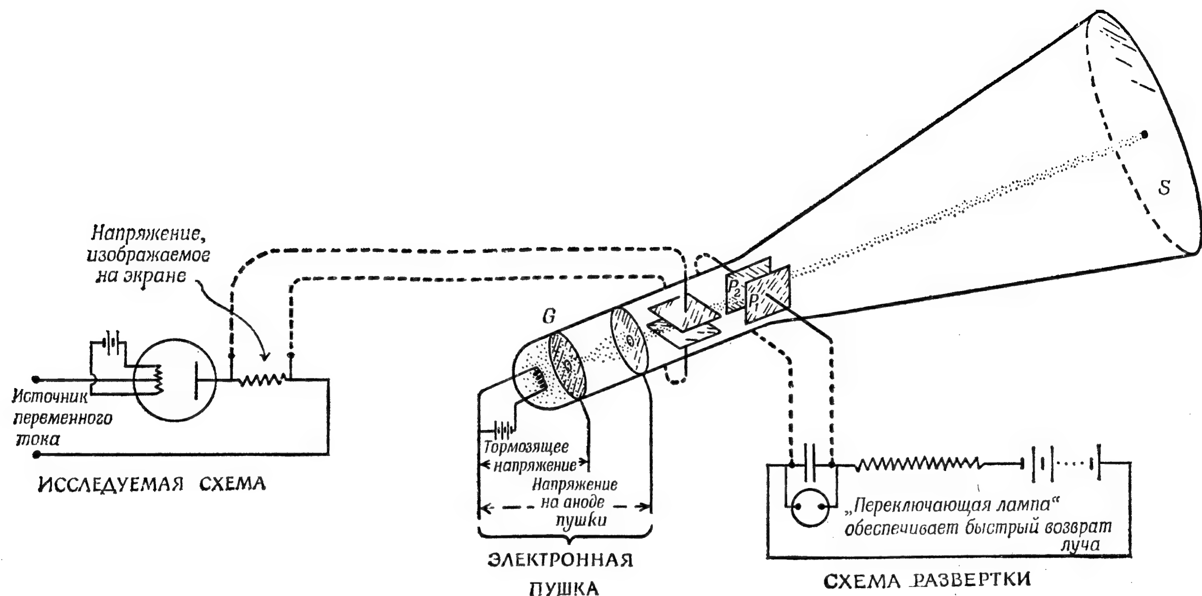
Фиг. 115. Трубка электронно-лучевого осциллографа.

находиться в определенном положении в верхней части экрана S, пока подсоединена батарея [1]. Если к пластинам P_1 и P'_1 подвести переменное напряжение, то пятно будет перемещаться вверх и вниз, практически мгновенно следуя за изменениями напряжения. Чтобы вычертить графическую картину изменения вертикального отклонения во времени, горизонтальное электрическое поле должно перемещать пучок с постоянной скоростью по экрану трубки в горизонтальной плоскости. Схема такой «развертки» рассмотрена в задаче 11 гл. 36. Вам следовало бы поработать с трубкой в лаборатории (опыт 10 гл. 41).

В телевизионной трубке пятно должно совершать периодическое перемещение вверх и вниз и справа налево, быстро покрывая всю площадь кадра. Одновременно с этим перемещением пятна по экрану его яркость должна изменяться под действием приходящих радиоволн, благодаря этому получаются светлые и темные части изображения.

---

[1] Между прочим, длительная бомбардировка одного места экрана вредна, луч может «прожечь» экран. Поэтому, работая с осциллографом в лаборатории, не следует надолго оставлять пятно в одной точке экрана. Трубку телевизионной камеры тоже можно повредить таким образом (хотя со временем ее свойства восстанавливаются), и оператору приходится внимательно следить за тем, чтобы не прожечь трубку.



Фиг. 116. Схема с простой электронно-лучевой трубкой для вычерчивания графической картины изменения тока во времени.

Разность потенциалов на сопротивлении, пропорциональная току в цепи, прикладывается к пластинам трубки и создает вертикальное отклоняющее электрическое поле. «Переключающая лампа» в цепи развертки представляет собой специальную газонаполненную радиолампу, подобную неоновой газосветной лампе. При низком напряжении эта лампа не проводит тока. Когда напряжение на ней достигает определенной величины, лампа внезапно вспыхивает, и через нее проходит ток (благодаря образованию ионов при столкновениях). Ток, проходящий через высокое сопротивление, заряжает конденсатор. Когда конденсатор зарядится до определенного напряжения, лампа вспыхивает, давая возможность конденсатору быстро разрядиться до нулевого напряжения. Таким путем получают пилообразное напряжение, необходимое для развертки.

Задача 12

Предположим, вы располагаете электронной пушкой типовой конструкции и вас попросили спроектировать телевизионную трубку. Как бы вы предложили осуществить изменение яркости *пятна? (Существует несколько схем, некоторые из них можно использовать не только в телевизионной трубке.)*

Указание. Электроны, которые ударяются об экран, должны обладать максимальной скоростью пучка, иначе они вообще не смогут возбудить свечение.

В современных телевизионных трубках отклонение электронного пучка осуществляется не электрическими, а магнитными полями. Вскоре вы увидите, что их можно использовать вместо электрических полей.

Энергия электрического поля. Волны

[Оставшаяся часть этой главы описывает необыкновенные явления, находящие полное объяснение и подтверждение при более серьезном изучении, чем то, которое предлагается здесь. Тем не менее она проливает некоторый свет на понятие электрической энергии и дает представление об электромагнитных волнах.]

Движущиеся заряды переносят с собой создаваемые ими поля, силовые линии поля движутся вместе с зарядами, подобно тому, как пышные усы — вместе с их обладателем. Во всем пространстве вокруг проводов электрической цепи, по которым течет ток, должны перемещаться силовые линии [1]. Именно эти движущиеся силовые линии переносят электрическую энергию от батареи к различным частям цепи через разделяющее их пространство. Силовые линии натягиваются и тянут заряды, поддерживая ток, и передают энергию своей упругой деформации, почти как движущийся приводной ремень.

Это движение сопровождается новым эффектом: появлением магнитного поля, у которого также есть силовые линии (силовые линии совсем иного рода, хотя и с похожей конфигурацией). Магнитное поле, связанное с протеканием тока по цепи, обладает, оказывается, собственным запасом энергии, количество которой пропорционально величине (сила тока)^2. Сходство с кинетической энергией, которая пропорциональна величине (скорость)^2, наводит на мысль, что энергию *магнитного поля* можно рассматривать как кинетическую энергию цепи, связанную, возможно, с кинетической энергией движения электронов. Эта «кинетическая энергия» магнитного поля тока дает основание считать, что оно обладает чем-то подобным массе. А потенциальная энергия, присущая *электрическим* полям, позволяет провести аналогию между их поведением и поведением пружины или растягиваемого шнура. В действи-

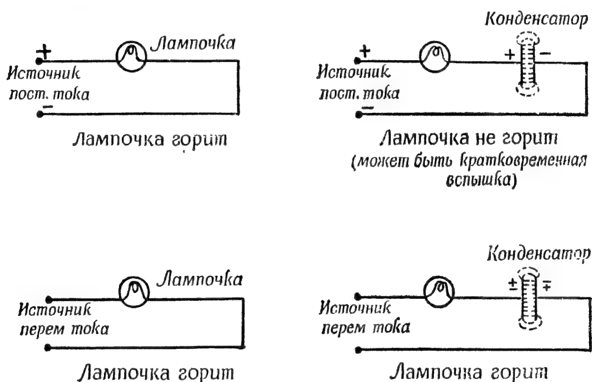
---

[1] Если вы представляете себе ток как медленное перемещение роя отрицательных электронов по проволоке, в которой остается неподвижным такое же скопление положительно заряженных атомов, то вы должны, кроме того, представить себе, что электроны несут с собой пучок силовых линий, входящих в электроны, в то время как положительные атомы связаны с пучком неподвижных силовых линий, выходящих из них. Движение силовых линий поля по-прежнему имеет место.

тельности между обоими видами поля существует взаимосвязь. Вместе взятые они образуют электромагнитное поле, обладающее как «пружинистостью», так и инертностью, или массой. Мы знаем, что в любой среде, которая характеризуется упругостью и массой, могут распространяться волны: вдоль натянутой веревки, вдоль массивной витой пружины, в воздухе — в виде звуковых волн. Таким образом, мы можем высказать смелую догадку и предположить, что в электромагнитном поле могут распространяться волны. И действительно, можно заставить электрическую цепь посылать волны, если быстро изменять текущий по ней ток. Это те самые радиоволны, существование которых столетие назад предсказал Максвелл. Вывод Максвелла представлял собой не просто догадку, а был основан на его математической формулировке законов электрического и магнитного полей.

Электромагнитные волны

В тех случаях, когда ток в цепи быстро меняется и заряды не просто движутся, но движутся с ускорением и замедлением, должны происходить изменения полей. Эти изменения, как мы теперь знаем, распространяются не мгновенно — информация о них достигает удаленных от цепи областей про-

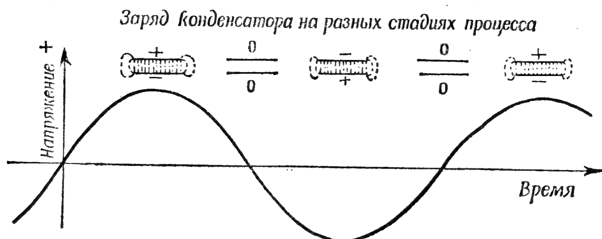


Фиг. 117. Конденсатор в электрической цепи.

Если конденсатор включен последовательно в цепь постоянного тока, лампочка обнаруживает в лучшем случае кратковременный импульс тока. Если цепь с конденсатором подключить к источнику переменного тока, то заряды будут то подходить к пластинам конденсатора, то уходить от них, проходя через лампочку. Поэтому лампочка горит, хотя и менее ярко, чем без конденсатора. Следуя предложению Максвелла, мы представляем себе, что через конденсатор проходит ток изменяющегося электрического поля, который создает магнитное поле с замкнутыми кольцевыми силовыми линиями.

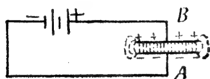
странства лишь некоторое время спустя. Чтобы понять, как это происходит, рассмотрим цепь с разрывом, наподобие той, о которой говорилось в начале этой главы (фиг. 51). Подключим цепь сначала к батарее, а потом к источнику переменного напряжения. На фиг. 117 показана такая цепь, причем в разрыв включен конденсатор, т. е. две пластины, параллельные друг другу и разде-

ленные воздушным промежутком. Под действием переменного напряжения заряды движутся то к пластинам конденсатора, то от пластин. В этом смысле говорят, что конденсатор *проводит* переменный ток. На фиг. 118 показано

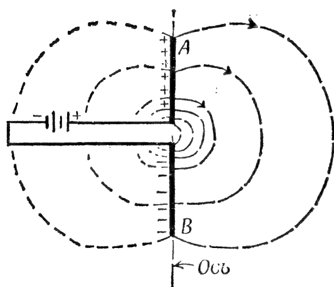


Фиг. 118. График зависимости переменного напряжения на конденсаторе от времени.

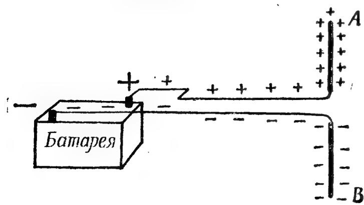
распределение зарядов на пластинах и график зависимости напряжения между пластинами от времени.



Фиг. 119. Заряжение антенной системы. Пара пластин, присоединенных к батарее, заряжается (одна положительно, другая отрицательно) до тех пор, пока разность потенциалов между ними не станет равной э. д. с. батареи. Если пластины заменить стержнями, то электрическое поле вокруг заряженных стержней будет таким, как показано на фигуре. Поле симметрично, причем стержни играют роль оси симметрии. Чтобы полностью представить себе картину поля, вообразите, что приведенный рисунок вращается вокруг этой оси. Остальные компоненты схемы, провода и батарея, тоже создают электрические поля; они здесь не показаны.

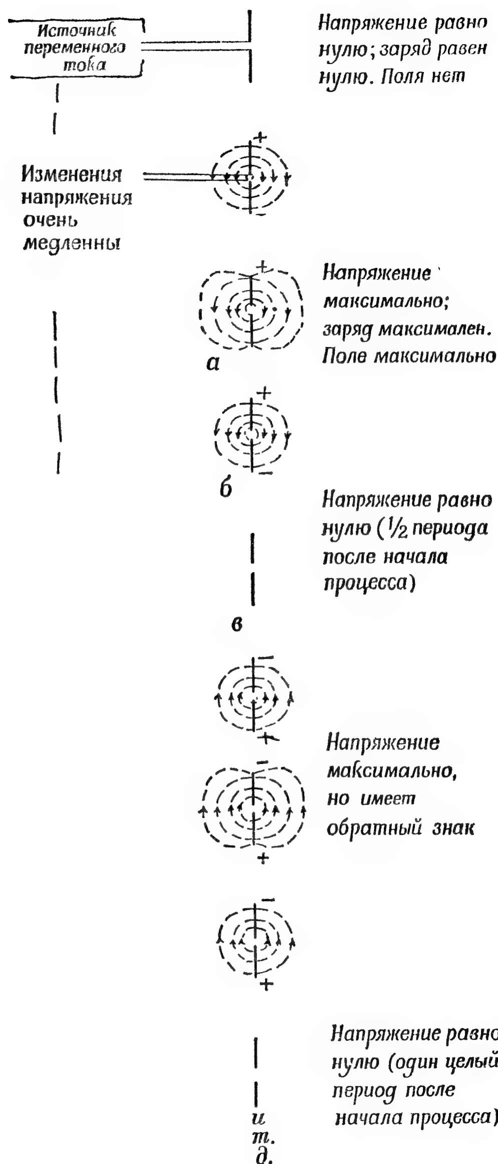


Чтобы распространить электрическое поле, существующее между пластинами, на большую область пространства, замените пластины двумя антен-



Фиг. 120. Антенные стержни заряжаются от батареи (положительно и отрицательно), при этом вокруг них создается электрическое поле.

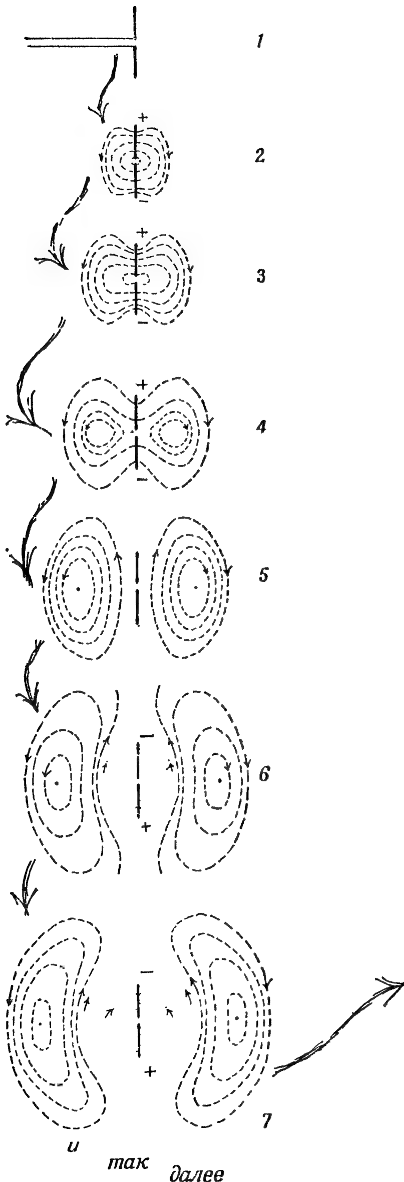
ными стержнями, *А* и *В*. На фиг. 119 показано электрическое поле вокруг стержней, заряженных от батареи. На фиг. 120, 121 представлены картины электрического поля около стержней, к которым приложено напряжение, медленно изменяющееся с течением времени по величине и направлению. Когда напряжение максимально, стержни заряжены (один положительно, другой отрицательно) так, как показано на фиг. 121, *а*. Фиг. 121, *б* соответствует моменту, когда напряжение уменьшилось вдвое; фиг. 121, *в* иллюстрирует состояние, в котором напряжение равно нулю. В стадиях от *а* до *б*



Фиг. 121. Дипольная антенна.

Антенна подключена к источнику переменного напряжения. Приведенные рисунки изображают картину электрического поля в окрестности обоих стержней. (Разумеется, вокруг остальной части схемы тоже существует поле.) Предполагается, что частота переменного напряжения очень мала, поэтому изменения поля происходят очень медленно. При нарастании и спадании напряжения заряды «приливают» в стержни и наоборот, при этом раскрываются и сокращаются громадные зонтики из силовых линий — возникает пульсирующее электрическое поле, которое находится в фазе с напряжением.

Изображенные конфигурации силовых линий соответствуют сечению реальной картины поля в плоскости поле на самом деле имеет пространственную картину. Чтобы представить себе ее, вообразите, что картина, изображенная в плоскости, вращается вокруг оси стержней.



Фиг. 122. Дипольная антенна.

Антенна подключена к источнику переменного напряжения высокой частоты. Изменение напряжения происходит очень быстро.

1 — источник напряжения включают в момент, когда напряжение равно нулю. Стержни не заряжены.

2 — напряжение, величина заряда и поле возрастают, этим сопровождается движение зарядов по стержням ($^1/_8$ периода спустя после включения источника).

3 — напряжение, величина заряда и поле возросли до максимума ($^1/_4$ периода после включения источника при незаряженных стержнях).

4 — напряжение, величина заряда и поле уменьшаются, удаленные же области поля остаются на своем месте. Участки линий, ближайшие к стержням, стягиваются, и внешние области линий поля превращаются в замкнутые петли.

5 — напряжение и величина заряда равны нулю ($^1/_2$ периода после включения источника). Однако поле остается в форме замкнутых петель, которые перемещаются от стержней, «отталкиваемые» вновь образующимися петлями.

6 — по стержням стремительно движутся новые заряды противоположного знака, вновь создавая поле в центральной области. Это нарастающее поле «отталкивает» петли предшествующего поля в области пространства, более удаленные от стержней.

7 — величина нового заряда и вновь появившееся напряжение достигают максимума. Образуется новое поле с обратным направлением стрелок, которое достигает максимума.

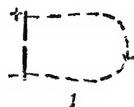
8 — картина поля спустя $1^1/_2$ периода после показанной выше. Сюда переместились крайние петли. Новая картина поля в окрестности стержней соответствует еще одной перемене знаков.

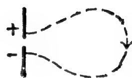
+

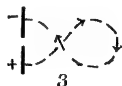
−

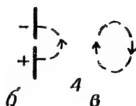
8

и от *б* до *в* заряды движутся вдоль стержней обратно к источнику, унося с собой свои силовые линии, которые постепенно исчезают. В следующую четверть периода напряжение, количество зарядов на стержнях и поле достигают максимума, но заряды на стержнях и напряжение будут противоположны этим величинам в стадиях *а*, *б*, направление поля также изменится на обратное. Затем все перечисленные величины снова изменяются до нуля, и мы возвращаемся к первой стадии процесса. Заряды нагнетаются к антенным стержням и откачиваются от них. Вдали от стержней можно обнаружить в лучшем случае слабое излучение.









Фиг. 123. Упрощенное объяснение образования петель из силовых линий поля.

Проследите за исчезновением одной силовой линии.

1 — при сближении зарядов, на которых начинается и оканчивается линия, происходит сближение участков линии, прилегающих к стержню, в то время как более удаленные участки остаются неподвижными.

2 — можно представить себе, что заряды каждого знака переходят прямо на противоположный стержень, а не идут к источнику и обратно.

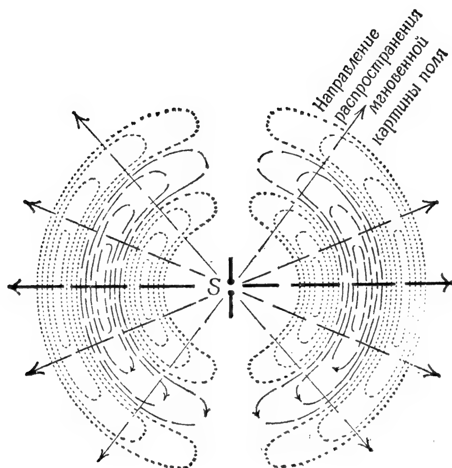
3 — если бы силовая линия оставалась подобной упругой трубке, она перекрещивалась бы, как показано на фигуре *а*.

4 — с настоящими силовыми линиями такого происходить не может, поэтому они разделяются: *а*→*б*+*в*.

На фиг. 122 показаны те же стадии при значительно более быстром изменении величины и направления переменного напряжения (или при значительно большей длине стержней). Удаленные части поля в каждый момент времени не получают вовремя информации об изменениях напряжения и не исчезают, подобно более близким частям. Они отделяются в виде замкнутых петель, которые потом оттесняются следующей группой силовых линий, появляющихся и увеличивающихся в размерах при новом нарастании напряжения. Представьте себе, что длинным кнутом внезапно хлопают с такой силой, что образующаяся на нем петля в результате резкого движения отрывается. От настоящего кнута петля, конечно, отделиться не может, а вот на силовых линиях поля может образоваться такая отделяющаяся петля. Вычисления, проведенные с помощью модифицированного уравнения $\nabla^2 V=0$ для движущихся зарядов, предсказывают именно такую картину. Схематические изображения картин поля, представленные на фиг. 122, 124, 125, основаны на таких вычислениях; впервые их проделал Герц, который первым же экспериментально получил радиоволны. Отделившись, петли уносятся со скоростью

света; находясь в движении, они и представляют собой свет, хотя их длина волны может не попадать в пределы узкой области длин волн видимого света.

Один за другим следуют периоды переменного напряжения, сопровождаемые появлением все новых и новых групп отделившихся петель-линий



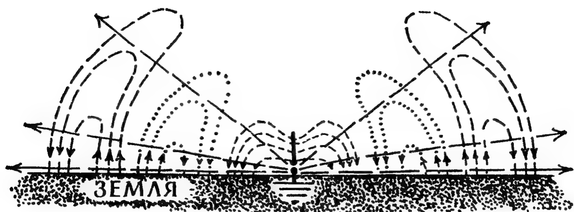
Фиг. 124. Радиоволны.

Мгновенная картина электрического поля, излучаемого двумя короткими стержнями (такими, как на предыдущих фигурах), подсоединенными к источнику быстропеременного напряжения. Видны замкнутые петли из силовых линий поля, которые отталкиваются по мере образования у стержней новых петель и распространяются дальше в виде радиоволн. Поле в непосредственной близости к стержням, изображенное на предыдущих фигурах, здесь не показано. Радиальные стрелки указывают направление распространения мгновенной картины поля, приобретающей все большие размеры по мере удаления от антенны. Вы должны представлять себе, как эта картина поля распространяется от источника (стержней) со скоростью света, увеличиваясь в размерах по мере удаления. Группа замкнутых петель из силовых линий поля распространяется практически в радиальном направлении от источника, как только выйдет из непосредственной близости к нему. Поэтому интенсивность излучения должна следовать закону обратной пропорциональности квадрату расстояния.

поля, изображенных на фиг. 124. Изменяющиеся электрические поля возбуждают в смежных областях пространства переменные магнитные поля; радиоволна — это и есть такое электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве.

Пара стержней представляет собой простую дипольную антенну (диполь), которую используют для приема и передачи ультракоротких радиоволн. Для длинных волн требуется антенна больших размеров. Одним «стержнем»

служит вся антенна, включая вертикальный провод, ведущий от нее, роль второго «стержня» играет зеркальное изображение антенны, располагающееся под поверхностью земли.



Фиг. 125. Радиоволны, испускаемые небольшой антенной, вблизи поверхности земли.

На фигуре показаны вертикальная антенна и поверхность земли (зеркальное изображение антенны относительно поверхности земли служит нижним «стержнем»); такая система излучает электромагнитные волны над поверхностью земли. Стрелки указывают направление распространения мгновенной картины поля, увеличивающейся в размерах по мере распространения.

Поле и движение. На подступах к теории относительности

На первый взгляд электрическое и магнитное поля кажутся не только непохожими, но и совершенно независимыми друг от друга. Однако между ними существует связь.

1. а) Покоящиеся заряды создают постоянные электрические поля.
   б) Покоящиеся магниты создают постоянные магнитные поля.
2. а) Установившийся ток в цепи создаст постоянное магнитное поле (и движущееся электрическое поле, хотя оно может и не обнаруживаться).
   б) Движущийся магнит создает движущееся вместе с ним магнитное поле и постоянное электрическое поле (в этом заключается принцип действия электрического генератора).
3. С изменяющимся током в цепи (например, переменным током) связаны изменяющиеся электрическое и магнитное поля. Такая цепь излучает электромагнитные волны, интенсивность излучения их становится больше, если изменения величины и направления тока происходят быстро, и цепь обладает правильно выбранной «площадью излучения».
4. Электромагнитные волны представляют собой движущееся электромагнитное поле — электрическое и магнитное поля, перпендикулярные друг к другу, которые вместе распространяются в пространстве. Изменения поля одного вида возбуждают в соседних областях пространства переменное поле другого вида, и электромагнитная волна продолжает распространяться.

Каким образом электрическое и магнитное поля связаны между собой? Более глубокие исследования показывают, что изменение или, образно говоря, движение поля каждого вида всегда сопровождается появлением поля другого

вида: движущееся электрическое поле создает магнитное поле, а движущееся магнитное поле создает электрическое поле. Но представьте себе, что движется не поле, а сам экспериментатор. Будет ли он наблюдать такое же магнитное поле, когда *он* движется поперек электрического поля, создаваемого зарядом? Если нет, значит, наш наблюдатель может сказать, что́ именно движется: он или заряд, а следовательно, он нашел способ обнаружить абсолютное движение. Другими словами, он может установить «верстовые столбы» в абсолютном пространстве. Только эксперимент может дать достоверный ответ на этот вопрос. Однако мы можем *высказывать предположения*, применяя обычную геометрию движения к законам Максвелла точно так же, как могли бы *мысленно построить* траекторию падающего апельсина, какой ее видит бегущий мимо наблюдатель. Размышляя таким образом, мы приходим к выводу, что законы Максвелла должны принимать какую-то иную, более громоздкую форму для любого наблюдателя, кроме «покоящегося», жестко связанного с «верстовым столбом», зафиксированным в пространстве. Но действительные эксперименты дают нам законы электродинамики в одинаково простой форме для какого угодно наблюдателя, покоящегося или движущегося по лаборатории. Что же является ошибочным: простые законы, которые подтверждает опыт, или простая геометрия, которой мы пользовались, выдвигая свое предположение?

Игнорируя это необычное противоречие, ученые XIX столетия пытались исследовать свое движение в пространстве по влиянию этого движения на опыты с электромагнитным полем. Любой измеренный эффект, пропорциональный скорости v, ясно обнаруживает наличие относительной скорости между экспериментатором и прибором, когда в лаборатории происходят изменения движений. Что же касается влияния какого бы то ни было движения лаборатории в пространстве как целого, то это влияние исключается простым вычитанием. Опыты эти показали, что неважно, как совершается относительное движение: движется ли наблюдатель, прибор или оба одновременно. Но пытались произвести и другие опыты: пытались измерить время прохождения световых вспышек по какому-либо пути и обратно в различных направлениях в пространстве. Световая вспышка представляет собой группу электромагнитных волн, распространяющихся в «пространстве», и измерение времени ее распространения могло бы дать эффект, зависящий от v^2. Таким образом, ученые могли бы, руководствуясь обычной геометрией, обнаружить наше движение в пространстве. Однако, несмотря на все новые и новые попытки, не удавалось обнаружить никакого эффекта. Мы уверены, что движемся, и тем не менее не обнаруживаем никакого движения. Какой же вывод мы должны сделать: что были неправильно проведены опыты, выбрана неподходящая геометрия или что неверна идея «верстовых столбов» в пространстве? Этот основной вопрос послужил толчком к созданию теории относительности.

Задачи к главе 33

Задачи 1—12 приведены в тексте главы.

Задача 13. Электрофор

Электрофор — это устройство, позволяющее получать неограниченное количество электрических зарядов. Электрофор состоит из:

а) плексигласового диска, заряжаемого трением о мех (при этом отрицательные электроны «соскабливаются» с меха и переходят на плекси-

глас, где остаются на поверхности или вблизи нее, поскольку плексиглас — очень хороший изолятор);

б) металлической пластины с изолирующей ручкой.

Заряды получают следующим стандартным способом (после того как плексиглас потерт мехом):

1) подносят пластину на близкое расстояние к плексигласу;

2) пальцем касаются пластины, чтобы соединить ее с землей (электрическим проводником огромных размеров);

3) убирают палец;

4) удаляют пластину: на ней остается заряд, которым можно воспользоваться.

Даже если пластина касается плексигласа, с него снимается очень небольшой заряд, ибо плексиглас — очень плохой проводник.

а) Изобразите рисунками различные стадии этого процесса, проставив на них знаки «+» и «—» там, где, по-вашему, есть заряды. Проведите силовые линии поля.

б) Объясните кратко, что́ происходит от одной стадии до ближайшей следующей.

Задача 14. Подготовка к опыту Милликена, посвященному измерению заряда электрона

Очень маленькой капельке жидкости (вылетающей из пульверизатора) сообщают заряд, равный заряду одного электрона. Капельку впускают в пространство между двумя горизонтальными металлическими пластинами, расположенными одна над другой. Пластины подсоединяют к батарее, которая создает в промежутке между ними вертикальное электрическое поле напряженностью 100 000 ньютон/кулон. (Это значение напряженности можно вычислить, зная напряжение батареи и расстояние между пластинами.) Если величина поля как раз достаточна, чтобы заставить капельку парить в воздухе, не поднимаясь и не опускаясь, то какова масса капельки?

Дано: ЗАРЯД ЭЛЕКТРОНА$=-1{,}60\cdot 10^{-19}$ *кулон.*

(Этот расчет, проведенный в обратном направлении, соответствует методу, посредством которого Милликен измерил заряд электрона.) Сравните полученный результат с пределом измерения наиболее чувствительных химических микровесов, близким к одной миллиардной грамма, или 10^{-12} кг.

Задача 15. Предварительная задача, связанная с опытом Милликена

При падении крошечной дождевой капельки сила сопротивления воздуха, действующая на капельку, изменяется прямо пропорционально скорости. *(Это тщательно проверено опытом.) Силы сопротивления, действующие на капли разных размеров, прямо пропорциональны радиусам капель. Следовательно, сила сопротивления воздуха$=K\cdot r\cdot v$, где K — постоянное число, известное из опытов по изучению движения воздуха в трубах. (Предположим, значение K таково, что произведение $K\cdot r\cdot v$ дает силу в ньютонах.) Когда дождевая капля начинает падать, она сначала движется ускоренно, но вскоре достигает постоянной скорости.*

а) Какие две силы действуют на каплю в любой стадии ее падения?

б) Чему должна быть равна результирующая сила, когда капля падает с постоянной скоростью?

в) Напишите уравнение, вытекающее из а) и б), используя К и другие коэффициенты, приведенные выше.

г) Предположим, что другая капля имеет вдвое больший радиус. Какова ее масса? Покажите из вашего уравнения в), что эта капля будет падать в четыре раза быстрее.

Задача 16. Электрические поля и закон обратной пропорциональности квадрату расстояния: подготовка к опыту Милликена

Мы используем электрические поля в целом ряде измерений в «атомной физике». Приводимая ниже задача поможет вам понять, что такое электрические поля.

НАПРЯЖЕННОСТЬ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ *определяется как* СИЛА *(в ньютонах), действующая на* ЕДИНИЦУ МАССЫ *(1 кг). Она измеряется в ньютон/кг.*

НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ *определяется как* СИЛА *(в ньютонах), действующая на* ЕДИНИЦУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА *(1 кулон). Она измеряется в ньютон/кулон.*

а) Какова (примерно) напряженность гравитационного поля Земли, т. е с какой силой (в ньютонах) Земля притягивает 1 кг
   в вашей лаборатории?
   в любой точке на расстоянии 6340 км от центра Земли?
   в любой точке на расстоянии 12 680 км от центра Земли?

б) Напряженность гравитационного поля Земли можно вычислить другим методом, исходя из гравитационной постоянной G. Это более утомительный и нерациональный способ, если мы уже знаем напряженность непосредственно из наблюдений за падающими телами, но он иллюстрирует метод, используемый для определения напряженности электрических полей. Покажите, что можно получить то же самое значение напряженности поля в лаборатории, воспользовавшись следующими данными:

Гравитационная постоянная $G=6{,}67\cdot10^{-11}$ (ньютон·м²/кг²), входящая в формулу $F=GM_1M_2/d^2$.

Расстояние от лаборатории до центра Земли $\approx6{,}34\cdot10^6$ м.

Масса Земли $\approx6{,}0\cdot10^{21}$ т $\approx6{,}0\cdot10^{24}$ кг.

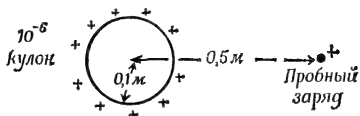
Используя формулу закона всемирного тяготения, вычислите приближенно *силу, с которой Земля притягивает* пробную массу *1 кг вблизи поверхности Земли. Это и есть напряженность гравитационного поля Земли в данной точке.*

в) Воздушному шарику, диаметр которого 0,2 м (радиус 0,1 м), сообщают заряд 1 микрокулон, т. е. $1\cdot10^{-6}$ кулон. (Это большой заряд для такого шарика.) Вычислите напряженность электрического поля на расстоянии 0,5 м от центра шарика. Постоянная $\mathcal{B}$, входящая в формулу закона обратной пропорциональности квадрату расстояния для силы взаимодействия зарядов, равна $9\cdot10^9$ (ньютон·м²/кулон). (Постоянная $\mathcal{B}$ появляется вместо G.)

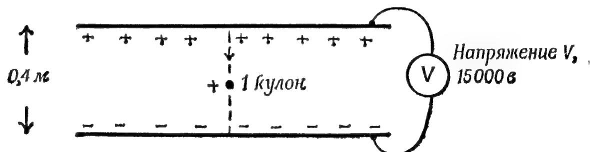
г) Вычислите напряженность электрического поля на расстоянии 1,0 м от центра шарика.

д) Когда мы имеем дело с электрическим полем в пространстве между двумя параллельными пластинами (таким полем пользовался Милликен при из-

мерении заряда электрона, оно используется в электронно-лучевых трубках для отклонения пучка электронов), мы исходим из опытных данных о том, что это поле однородно. *Это значит, что поле имеет одинаковую напряженность всюду в пространстве между пластинами и направлено прямо от одной пластины к другой перпендикулярно пластинам. Если мы знаем напряжение между пластинами (допустим, что к пластинам подключен вольтметр параллельно батарее, подсоединенной к пластинам для создания поля), то мы можем вычислить поле, как в следующем примере. Предположим, что разность потенциалов между двумя параллельными пластинами, отстоящими друг от друга на 0,4 м, равна 15 000 в.*



Фиг. 126. К задаче 16.



1) *Разность потенциалов 15 000 в между пластинами означает, что... . Дополните эту фразу.*
2) *Исходя из 1), вычислите энергию, сообщаемую электрическим полем 1 кулону, проходящему от одной пластины до другой, в джоулях.*
3) *Предположим, что 1 кулон, помещенный в поле в качестве пробного заряда, испытывает силу X ньютонов (т. е. предположим, что напряженность поля между пластинами равна X ньютон/кулон). Представим себе, что эта сила движет кулон от одной пластины до другой. Какое количество энергии будет таким образом сообщено кулону? (Обратите внимание, что оно в точности равно произведению* СИЛА·ПУТЬ.)
4) *Напишите уравнение, из которого следует, что в 2) и 3) в ответе получается одна и та же величина. Решите это уравнение и найдите напряженность поля X.*

Задача 17. Задачи с применением математического анализа. (Эти задачи имеют важное значение для изучения атомной физики.)

Чтобы детально разработать любую картину строения атома, вроде простой модели Бора, необходимо знать потенциальную энергию отрицательного электрона на расстоянии r от положительного ядра. (Точно так же, попытавшись рассчитать орбиту планеты, мы столкнемся с необходимостью определить потенциальную энергию тела в гравитационном поле.) Для этого нам нужно знать разность потенциалов V между бесконечностью и точкой, удаленной от заряда ядра Q на расстояние r. Если заряд +1 кулон при пере-

несении его из бесконечности в точку, удаленную от ядра на r, приобретает электрическую потенциальную энергию V дж, то электрон с зарядом e приобретает энергию Ve дж. Поскольку e отрицательно и равно $-1{,}6\cdot10^{-19}$ кулон, электрон при переходе его из бесконечности на орбиту с радиусом r теряет потенциальную энергию. Вот почему электрон не может покинуть орбиту, пока ему не будет сообщена добавочная энергия путем бомбардировки. Итак, вы найдете выражение для V, которым пользуются в атомной физике. Оно получается в результате вычисления работы, совершаемой против силы отталкивания $\mathcal{B}Q(1)/d^2$ при перенесении +1 кулон из d=бесконечности в d=r. Сила отталкивания меняется с изменением расстояния d, поэтому определить V простым перемножением СИЛА·ПУТЬ *нельзя. Вместо этого мы должны разбить весь путь на очень короткие участки, вычислить работу на каждом участке и сложить результаты. Разбивая путь на все более короткие участки, мы получим в пределе то, что дает метод математического анализа, называемый интегрированием. (Существуют приемы, позволяющие проделать этот расчет без помощи математического анализа, однако каждый, кто в состоянии проследить за подобными выкладками, смог бы за это время познакомиться с математическим анализом, доставив себе большое удовольствие.) Приведем вывод формулы математического анализа, заменив букву d на x.*

Предположим, что пробный заряд +1 кулон проделал часть пути, находясь на расстоянии x, и мы перемещаем его еще на некоторый отрезок пути —dx. (Символ d употребляется вместо Δ в случае предельного перехода и обозначает бесконечно малую величину, а знак минус указывает на перемещение в направлении начала отсчета величины x, т. е. означает отрицательное приращение x.) Тогда работа на этом отрезке пути равна

$$\text{СИЛА}\cdot\text{ПУТЬ, или } \left[\frac{\mathcal{B}Q(1)}{x^2}\right][-dx].$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} V &= \text{ПОЛНАЯ РАБОТА} = \\ &= \text{СУММА ВСЕХ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ РАБОТ НА ПУТИ ИЗ БЕСКОНЕЧНОСТИ ДО } x=r \\ &= \int_{\infty}^{r}\left(\frac{\mathcal{B}Q(1)}{x^2}\right)\cdot(-dx). \end{aligned}$$

***Работа**, совершаемая внешней силой, переходит в потенциальную энергию заряда в электрическом поле. Записанный интеграл равен потенциальной энергии, приходящейся на единицу заряда.*

а) Произведите интегрирование, помня, что $\mathcal{B}$ — постоянная, равная $9{,}0\cdot10^9$, а Q — заряд центрального ядра — тоже постоянная величина.

б) Решение задачи а) дает величину V на расстоянии r от точечного заряда Q. Оно дает, кроме того, величину V на поверхности заряженного шара радиуса r, несущего заряд Q. Почему?

в) Исходя из б), оцените потенциал металлического шара величиной с бейсбольный мяч ($r\approx0{,}05$ м), несущего заряд 1 микрокулон (10^{-6} кулон). Потенциал шара выражается в вольтах.

г) В соответствии с простыми моделями атома «радиус» атома водорода — то расстояние от ядра, на котором электрон проводит бóльшую часть вре-

мени,— близок к 0,5 Å ($=0,5\cdot 10^{-10}$ м). Заряд электрона равен $-1,6\cdot 10^{-19}$ кулон; ядро, находящееся в центре, обладает таким же по абсолютной величине положительным зарядом.

1) Вычислите величину V, обусловленную зарядом ядра, равным $+1,6\cdot 10^{-19}$ кулон, на «наружной поверхности» атома (для атома водорода).

2) Вычислите потенциальную энергию электрона в джоулях там же, умножив V на заряд электрона, равный $-1,6\cdot 10^{-19}$ кулон.

Затем разделите полученную величину на заряд электрона, чтобы выразить потенциальную энергию в электронвольтах. (Обратите внимание на то, что эта потенциальная энергия отрицательна. В модели Бора электрон обладает, кроме того, кинетической энергией, которая численно ровно вдвое меньше потенциальной и, конечно, положительна. Таким образом, половина найденного здесь вами значения указывает энергию, которую необходимо затратить, чтобы выбить электрон из атома и превратить атом в ион. Опыты по бомбардировке атомов водорода показывают, что для атома водорода эта энергия равна 13,6 электронвольт.)

3) α-частицами, несущими заряд $+2\ e$, обстреливают атомы золота. Изредка какая-нибудь α-частица отлетает строго назад. В этом случае мы представляем себе, что α-частица движется к атому золота, преодолевая силу отталкивания со стороны большого положительного заряда ядра атома, пока не потеряет всю свою кинетическую энергию, которая переходит в потенциальную энергию частицы в электростатическом поле. После этого α-частица летит назад. Из приведенных ниже данных (все они взяты из опытов) оцените, на какое самое близкое расстояние α-частица приближается к ядру атома золота. Сравните свой ответ с традиционным «размером» атома (радиус порядка $0,5\cdot 10^{-10}$ м).

ОПЫТНЫЕ ДАННЫЕ. *α-частица, вылетающая из ядра атома радия, имеет:*

скорость $v \approx 1,6\cdot 10^{7}$ *м/сек*,
массу $m \approx 6,6\cdot 10^{-27}$ *кг*,
заряд $2e = +2\cdot 1,6\cdot 10^{-19}$ *кулон*.

Ядро атома золота значительно более массивное, а заряд его равен $79\ e = +79\cdot 1,6\cdot 10^{-19}$ кулон.

ГЛАВА 34 • МАГНЕТИЗМ
ОПЫТ И ТЕОРИЯ

> Отличительная особенность магнитов — их пол... Тот сорт магнита, что был найден в Трое, имеет черный цвет и женский пол и, следовательно, лишен притягивающей силы.
>
> *Плиний.*
>
> «Естественная история» ~77 г. н. э.

Электрические поля ускоряют и отклоняют пучки электронов, но их оказывается недостаточно, чтобы узнать *заряд*, *массу* и *скорость* движущихся электронов или заряженных атомов. Для этого необходимы еще и *магнитные поля*. Так что прежде, чем начать изучение атомов, мы должны вкратце познакомиться с магнетизмом. Цель настоящей главы показать, чтó представляют собой магнитные поля и как они используются для изучения атомов. В ней дается также простая теория магнетизма, которая может служить примером очень хорошей теории.

Магниты

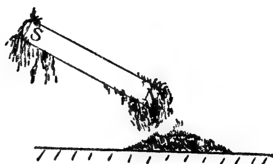
Магнит — это металлический брусок, который может притягивать небольшие кусочки железа, например железные опилки. К концу нашего повествования мы, возможно, захотим видоизменить это грубое определение, но на том более высоком уровне понимания оно нам уже не потребуется [1]. Вначале перечислим четыре основных свойства магнитов:

---

[1] Физика далеко не всегда нуждается в формальных определениях, подобных тем, которые встречаются в словарях. Физическая идея может быть понятна и плодотворна, хотя и не поддается точному определению. (Напомним о трудности определения понятия СПРАВЕДЛИВОСТИ в религии и философии.) С другой стороны, нам, безусловно, необходимо выработать четкие определения для тех *физических величин*, которые мы *измеряем* (например, температуры, напряженности электрического поля и т. п.). «Так как, без сомнения, истинный смысл физической величины следует находить на основании того, чтó человек делает с ней, а не того, чтó он говорит о ней»,— P. W. Bridgmen, The Logic of Modern Physics.

1) Магниты притягивают и захватывают небольшие кусочки железа.

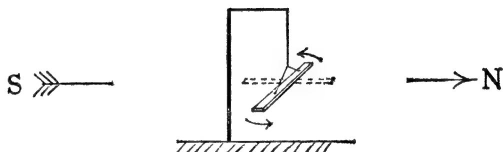
2) Длинный магнит, подвешенный на нити, поворачивается до тех пор, пока не устанавливается приблизительно в направлении



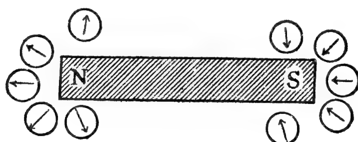
Фиг. 127. Магнит притягивает железные опилки.

север — юг (N—S). Подвешенные магниты другой формы также самостоятельно ориентируются, показывая, что у них имеется определенная «магнитная ось», которая стремится принять направление N—S.

Фиг. 128. Подвешенный магнит ориентируется в направлении север — юг. Его конец, указывающий на север, называется северным магнитным полюсом.



3) Стрелки компаса (как и всякий свободно вращающийся магнит), помещенные вблизи другого большого магнита, стремятся повернуться к «полюсам» этого магнита.

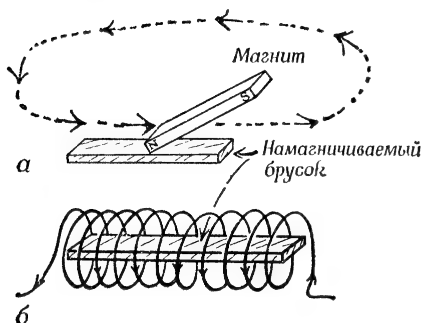


Фиг. 129. Определение полюсов магнита с помощью компасной стрелки.

Компасная стрелка, которая сама является небольшим, свободно вращающимся магнитом, поворачивается так, что ее северный полюс указывает на южный полюс магнита (или ее южный полюс на северный полюс магнита). В действительности, компасная стрелка показывает направление магнитного поля, создаваемого большим магнитом. Силовые линии этого поля исходят из областей вблизи полюсов, но выходят из магнита не под прямым углом, так как в отличие от электрических свойств металла магнитные материалы не являются хорошими магнитными «проводниками».

4) Если стержни, сделанные из подходящего материала, потереть магнитом, то они намагнитятся. Этот способ — трение магнит-

ного железняка, естественного магнитного материала, о стальной стержень — и был древнейшим способом получения магнитов. Сейчас гораздо проще и лучше намагничивать стержень,



Фиг. 130. Намагничивание стального бруска.

а — по бруску проводят магнитом, *б* — брусок на короткое время помещается внутрь катушки с током.

помещая его внутрь проволочной катушки, через которую пропущен электрический ток.

Полюсы [1]

Те места магнита, которые сильнее всего притягивают железные опилки, называются *полюсами*. У длинных намагниченных брусков полюсы обычно находятся на концах, хотя, если постараться, можно изготовить магнит и с полюсами в других местах. Пробная компасная стрелка, поднесенная к полюсу магнита, будет точно указывать на этот полюс. Вообще говоря, полюсами следует считать те области магнита, откуда исходит его магнитное действие. Простой намагниченный брусок, свободно подвешенный за середину, будет крутиться до тех пор, пока его полюсы не совпадут с линией, идущей приблизительно в направлении север — юг. Таким образом, за ось магнита можно принять прямую, соединяющую его полюсы. Полюс магнита, который поворачивается к се-

---

[1]) Если наблюдать магнит в действии, то в существование полюсов очень легко поверить как в реальность. Сейчас мы уже знаем, что на самом деле никаких полюсов не существует, так как все свойства магнитов связаны с внутриатомными электронными токами, не имеющими разделенных «полюсов». Хотя привлечение понятия полюсов в учебных целях в настоящее время и не поощряется, мы все же пока воспользуемся им, не вкладывая в него какой-либо реальный смысл.

веру, мы сокращенно называем северным полюсом и обозначаем буквой N, вкладывая в это название тот смысл, что этот полюс указывает на север [1].

ОПЫТЫ С МАГНИТАМИ

(Посмотрите демонстрации этих опытов или проделайте их сами.)

Опыт 1. *Изготовление магнитов.* Поместите стержни из различных материалов внутрь полой проволочной катушки, через которую пропущен электрический ток. Исследуйте магнитные свойства стержней с помощью железных опилок или мелких гвоздей при включенном и выключенном токе. Попробуйте также, как действует переменный ток. Эти эксперименты покажут вам, что

1) большинство веществ, как, например, медь, стекло, дерево, не поддаются намагничиванию;
2) железо, сталь и некоторые сплавы (эти материалы называются магнитными) можно намагнитить. Они частично сохраняют свою намагниченность и после выключения тока, или если их вынуть из катушки с током;
3) с помощью катушки, через которую пропущен переменный ток, удается размагнитить намагниченный стержень;
4) тем не менее, используя ту же катушку с переменным током, можно сохранить стержень намагниченным;
5) из некоторых сортов закаленной стали выходят отличные постоянные магниты. Мягкое железо намагничивается лишь на то время, когда через катушку течет электрический ток, а после выключения тока оно почти полностью теряет свои магнитные свойства;
6) электрический ток в полой катушке без всякого железного сердечника сам по себе обладает магнитным действием.

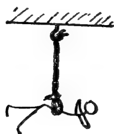
Опыт 2. *Подвешенные магниты.* Подвесьте к кронштейну стержень на шелковой нити. Заметьте его ориентацию и затем поднесите к его концам другие стержни. Вы увидите, что

7) если стержень намагничен, то он устанавливается во вполне определенном положении, приблизительно в направлении N—S;
8) ненамагниченный кусок мягкого железа или немагнитный медный стержень остаются неподвижными [2];
9) полюсы магнита, которыми он захватывает железные предметы, будут притягивать или оттални-

---

[1] Те, кто уже изучал физику, могут заметить, сколь тривиальными представляются теперь эти сведения, хотя в некоторых элементарных курсах им придается самостоятельное значение.

[2] Если подвесить *вас* на веревке, то *ваше* тело тоже займет некоторое определенное положение и, будучи выведенным из него, обязательно воз-



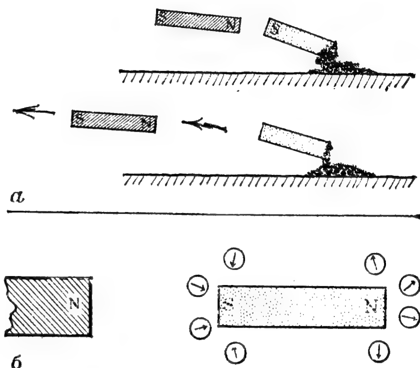
Фиг. 131.

вать полюсы другого магнита; легко убедиться, что магниты имеют два типа полюсов, обычно по одному на каждом конце, причем отталкивание и притяжение происходят следующим образом:

N-полюс отталкивает N-полюс, S-полюс отталкивает S-полюс, N-полюс и S-полюс притягивают друг друга.	«ОДНОИМЕННЫЕ ПОЛЮСЫ ОТТАЛКИВАЮТСЯ, А РАЗНОИМЕННЫЕ ПРИТЯГИВАЮТСЯ».

Силы взаимодействия между двумя полюсами обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними (закон обратных квадратов). Открыть или проверить этот закон не так-то легко. Для этого нужны два изолированных полюса, способных двигаться по направлению друг к другу или друг от друга. Мы не можем воспользоваться для этого двумя обычными магнитами, поскольку каждый из них обязательно имеет оба полюса, и должны прибегнуть к специальным ухищрениям, как, например, взять очень длинные магниты, у которых другие полюсы находятся столь далеко, что уже не играют роли. Мы можем также взять небольшие магниты и проверить, совпадают ли силы взаимодействия с теми, которые предсказываются законом обратных квадратов для всех четырех полюсов. Тщательные эксперименты, в которых силы взаимодействия измеряются путем уравновешивания (или с помощью крутильных весов Кулона), показывают, что они действительно хорошо соответствуют закону обратных квадратов. Хотя здесь мы и не имеем таких совершенных критериев, как, например, отсутствие электрического поля внутри заряженного металлического ящика в электростатике, зато располагаем другими, вполне удовлетворительными косвенными методами.

Опыт 3. *Постоянные и временные полюсы.* Подвесьте на нити брусок из мягкого железа. Вы заметите, что



Фиг. 132.

а — мягкое железо временно намагничивается в присутствии другого магнита; *б* — полюсы магнита из мягкого железа.

10) Мягкое железо всегда притягивается обоими полюсами магнита.

Погрузите магниты в железные опилки. Опустите туда и стержень из мягкого железа. Выньте и снова погрузите один конец стержня из мягкого железа в опилки, а к другому его концу поднесите полюс магнита.

11) Магнит, находящийся вблизи стержня из мягкого железа, сообщает ему на некоторое время способность притягивать железные опилки (фиг. 132).

вратится обратно, но по причинам, уже не связанным с магнетизмом. Каким способом можно было бы убедиться, что поддерживающая нить не искажает результатов ваших опытов с магнитами?

Дальнейшие опыты показывают, что это явление объясняется временным намагничиванием мягкого железа, причем направление намагничивания обеспечивает притяжение стержня магнитом.

Задача 1

Какие экспериментальные факты еще до того, как вы испробовали действие магнита на подвешенный железный стержень, убеждали вас в том, что мягкое железо легко меняет свою намагниченность?

Опыт 4. *Применение компаса.* Закрепите магнит на оси так, чтобы он легко поворачивался в горизонтальной плоскости. Именно так и действует стрелка компаса! Некоторые из предыдущих экспериментов можно теперь повторить, поднося к магниту компас (фиг. 129). Это даст нам возможность использовать компасную стрелку для маркировки полюсов любого магнита индексами N и S. Острие стрелки компаса, которое (приблизительно) указывает на север, мы зовем северным полюсом (N-полюсом) и все аналогичные полюсы других магнитов тоже называются северными. (См. ниже замечание о магнитных полюсах Земли.)

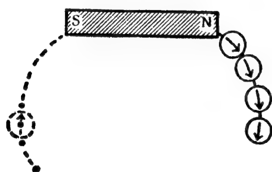
Опыт 5. *Временное намагничивание мягкого железа.* Найдите с помощью компаса северный и южный полюсы длинного магнита и подержите один из его концов около конца бруска из мягкого железа. Проверьте, что на каждом конце бруска образуются полюсы. Поверните магнит другой стороной и снова исследуйте железный брусок. Какие полюсы возникли у бруска в том и другом случае?

Магнитные поля

Мы говорим, что магнит всюду вокруг себя создает магнитное поле, аналогично тому, как электрические заряды создают электрические поля. *Линии, вдоль которых двигался бы маленький пробный северный полюс, мы называем магнитными силовыми линиями.* Если же возможность получить свободный полюс кажется вам сомнительной, то под ними можно подразумевать линии, вдоль которых ориентируется крошечная компасная стрелка. Оба этих определения эквивалентны: магнитное поле, которое притягивает северный полюс стрелки в направлении вдоль силовой линии, отталкивает ее южный полюс в обратном направлении, заставляя стрелку повернуться *вдоль линии.* (Напряженность магнитного поля мы могли бы по аналогии с напряженностью электрического поля определить как результирующую силу, действующую на единичный пробный полюс со стороны всех расположенных поблизости магнитов. Однако вводить такое определение нет необходимости.) Картину расположения магнитных силовых линий можно воспроизвести, исходя из

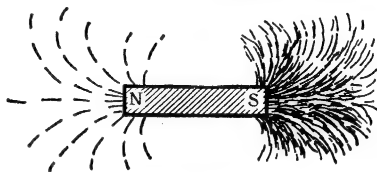
закона обратных квадратов точно таким же путем, как и для электрических полей. Поэтому большинство рассуждений, касавшихся характера распределения электрического поля, применимо и здесь. Нужно только не забывать о том, что у нас нет таких идеальных проводников магнетизма, какими являются металлы для электричества. И хотя конфигурации силовых линий обоих полей бывают сходными, магнитное поле по своей природе совершенно отлично от электрического. Это два различных силовых поля, и одно из них относится к тем физическим объектам, которые мы называем магнитами, а другое создается обычными электрическими зарядами.

Опыт 6. *Магнитные поля.* Чтобы лучше познакомиться с природой магнитного поля и расположением магнитных силовых линий, проведите опыты с компасной стрелкой. Как бы ни была помещена стрелка, она устанавливается в направлении магнитного поля. Положите магнит



Фиг. 133. Вычерчивание карты магнитного поля с помощью компаса.

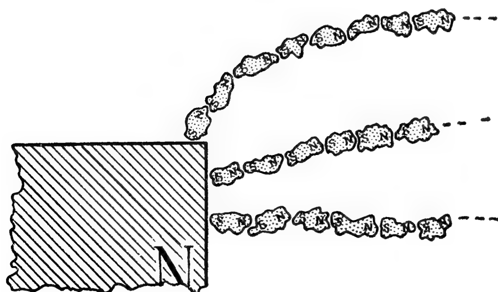
Приблизьте небольшой компас к северному полюсу магнита и поставьте точку у северного полюса компасной стрелки. Перемещайте компас в направлении, указываемом стрелкой до тех пор, пока точка не окажется сзади ее южного полюса. Снова поставьте точку впереди северного полюса стрелки и т. д.



Фиг. 135.

Сделайте аналогичные карты для различных расположений магнитов, показанных на фиг. 137.

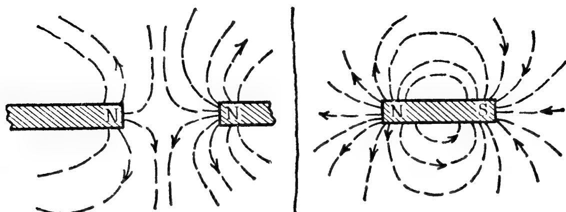
Размер каждой карты должен быть с ладонь руки или больше. Советуем вам при составлении карты пользоваться пунктирными линиями. Помните, что небольшое число основных линий лучше передает общую картину, чем густое скопление.



Фиг. 134. Железные опилки указывают расположение силовых линий.

и рядом с ним небольшой компас на лист бумаги. Перемещайте компас в направлении, указываемом его стрелкой. При этом ваш компас будет двигаться вдоль магнитной силовой линии. Отмечайте путь компаса на бумаге. Для этого поставьте карандашом точку прямо против острия компасной стрелки. Передвиньте компас дальше, так, чтобы точка осталась позади. Поставьте следующую точку и т. д., как показано на фиг. 133. После этого начните снова и наметьте вторую линию, идущую из другой начальной точки, и продолжайте так до тех пор, пока вы не получите полную картину распределения линий. Возможно, что некоторые линии вам будет удобно начинать от края листа.

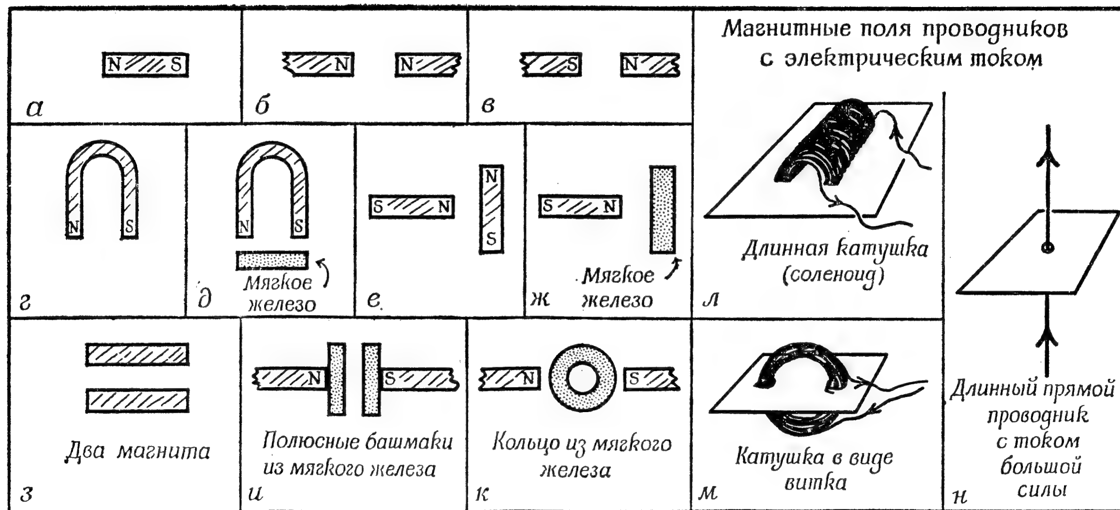
Вместо компаса можно воспользоваться железными опилками, которые ведут себя как небольшие компасные стрелки, соединяясь в цепочки, идущие вдоль силовых линий. Опилкам труднее поворачиваться, поэтому помогите им выстроиться, легонько постучав по листу бумаги. Сделайте натурные зарисовки силовых линий для различных расположений магнитов. Помните, что несколько расходящихся в разные стороны линий дают лучшее представление об общей конфигурации поля, чем их густое скопление (фиг. 135, 136). На фиг. 137 показано несколько примеров расположения магнитов, для которых полезно изучить ход силовых линий.



Фиг. 136. Примеры конфигураций магнитного поля.

Интерпретация карт магнитного поля

Составляя карты различных магнитных полей, мы видим, что они могут кое-что рассказать нам о силах, которые действуют на магниты, создающие эти поля. Силовые линии кажутся похожими на упругие натянутые трубки, которые пытаются сокращаться в продольном направлении, одновременно расталкивая друг друга и выгибаясь в сторону, как если бы они были заполнены жидкостью. Конфигурация линий между северным и южным полюсами напоминает протянутые навстречу щупальца, что говорит о притяжении; между двумя северными полюсами линии сплюснуты и наталкиваются друг на друга, как буфера, что свидетельствует о силах отталкивания. В более сложных случаях можно



Фиг. 137. Примеры расположения магнитов для составления карт магнитного поля.

заметить, что силовые линии как бы растягивают и изгибают магнит.

По мере приближения к полюсу силовые линии сходятся все более тесно. Мы уже знаем, что у полюсов магнитное поле становится сильнее (закон обратных квадратов). Так что сгущение силовых линий идет рука об руку с ростом напряженности поля. Если детально исследовать самые различные конфигурации силовых линий, то обнаружится, что чем больше сгущаются линии, тем сильнее становится поле. Таким образом, картина силовых линий может дать нам представление о напряженности поля. (В более серьезных курсах магнетизма эта идея преломляется в некоторый способ численного определения напряженности магнитного поля по густоте силовых линий.)

Полезно выработать привычку представлять себе магнитные силовые линии как агенты, посредством которых магниты притягивают и отталкивают друг друга, так как это представление приложимо и к магнитным силам, с которыми электрические токи взаимодействуют с другими токами и магнитами. Таким образом, карты магнитных полей дают нам в руки способ наглядного изображения действия электрических моторов, амперметров и т. п. приборов.

Электрическое поле имеет совсем другую природу, однако конфигурация силовых линий этого поля также может сказать о его напряженности. Можно представить себе, что радиоволны бегут вдоль комбинации силовых линий электрического и магнитного полей наподобие колебаний туго натянутых веревок. Этот пример дает ощущение того, что силовые линии электрического и магнитного полей вполне реальны. Конечно, не следует забывать, что в действительности существуют не силовые линии, а сами поля.

Магнитное поле Земли

Если воспользоваться компасом, чтобы построить карту окружающего нас магнитного поля, то мы получим ряд параллельных линий, идущих приблизительно с севера на юг. Подвешенный на нити намагниченный стержень, представляющий собой гигантскую компасную стрелку, повернется в том же направлении. Эти линии говорят о существовании магнитного поля, которое, разумеется, останется и после того, как мы уберем все наши магниты. Обследовав всю поверхность Земли, мы увидим, что линии сходятся на севере Канады, а также в некоторой области в Австралии. Почти повсюду эти линии идут не горизонтально, а

наклонены к земной поверхности[1]. Их направление указывает на то, что Земля похожа на огромный магнит с магнитной осью, слегка повернутой относительно географической оси вращения (фиг. 138). Именно это слабое земное магнитное поле используется для навигации с помощью компаса, несмотря на то, что стальные корабли обладают собственным магнитным полем, которое частично имеет переменный характер, что сильно затрудняет навигационное дело.

Северный полюс стрелки компаса указывает на север Канады. Следовательно, там должен находиться южный магнитный полюс Земли. (Этот полюс, однако, называют Северным магнитным полюсом. Если это будет вас затруднять, то избегайте таких сокращений, как «северный полюс», и называйте все полюсы их полными именами, т. е. «полюс, указывающий на север». Это избавит от путаницы. Когда же вы полностью уясните себе этот вопрос, вам, возможно, снова захочется вернуться ради экономии времени к сокращенным наименованиям.)

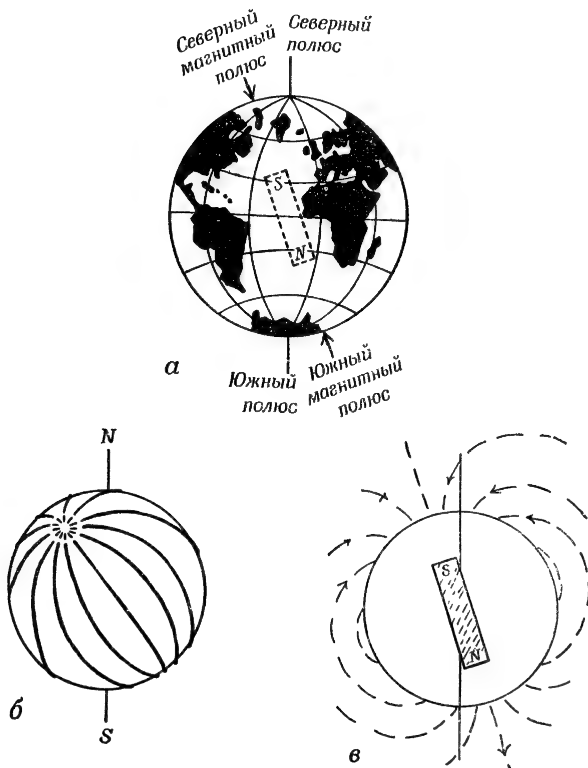
Магнитное поле Земли на значительных пространствах однородно, т. е. имеет постоянное направление и напряженность. Поэтому с его помощью можно провести очень важный опыт — проверить равноправность северного и южного полюсов магнита. Положим магнит на пробку и пустим его плавать в воду. Земное магнитное поле повернет магнит в направлении N—S. Будет ли оно также перемещать его в каком-либо определенном направлении, например на север? Если северный и южный полюсы плавающего магнита обладают равной силой (хотя создаваемые ими поля противоположны по направлению), можно ожидать, что магнитное поле Земли будет притягивать их одинаково. Под действием такого притяжения магнит повернется вокруг своей оси, но не будет двигаться по поверхности воды ни на север, ни в каком-либо другом направлении. Если же полюсы плавающего магнита неодинаковы, то можно ожидать, что магнитное поле Земли будет действовать на них с различной силой и заставит магнит переме-

---

[1] На большей части территории Соединенных Штатов магнитное поле Земли круто наклонено вниз под углом до 70° к горизонту. Магнит, способный следовать за полем, должен был бы наклоняться в том же направлении. Почему же обычная компасная стрелка остается в горизонтальном положении и не перекашивается? Ведь ось никак не может предотвратить перекос, и мы должны были бы увидеть, что северный кончик стрелки царапает дно коробки компаса. Если вы дадите правильный ответ на этот вопрос, то поймете, что имеется простой способ проверить вашу догадку опытным путем, и сможете сами выбрать подходящий прибор для такой проверки.

щаться в некотором направлении. Проведите этот важный опыт сами.

Хотя земное магнитное поле довольно слабое, оно способно заметно искривить путь электронного пучка. В следующих разде-



Фиг. 138. Эквивалентный магнит для внешнего магнитного поля Земли.

а — Земля и эквивалентный магнит; *б* — магнитные силовые линии на поверхности Земли показывают только направление (но не напряженность) горизонтальной компоненты земного магнитного поля; *в* — Земля и ее магнитное поле в разрезе.

лах мы увидим, как магнитное поле может выталкивать проводник с электрическим током, действуя подобно катапульте. Потоки заряженных частиц космического излучения, приходящие из мирового пространства, также заворачиваются земным магнитным

полем. Это позволяет использовать Землю во многих современных экспериментах с космическими лучами как гигантский анализирующий магнит.

Как намагничивают магниты

В современной практике намагничивание магнитов производится с помощью электрического тока. Для этого ток пропускается не через намагничиваемый металлический брусок, а через намотанную вокруг него проволочную катушку. Магнитное поле внутри длинной цилиндрической катушки (соленоида) однородно, а напряженность его легко менять, регулируя ток. Поэтому такая катушка чрезвычайно удобна для опытов по намагничиванию. Если мы поместим стальной брусок внутрь соленоида и подадим в катушку ток, то увидим, что при включенном токе брусок намагничивается. После выключения тока брусок по-прежнему остается магнитом, хотя и несколько более слабым. Для намагничивания бруска достаточно пропускать ток через катушку в течение всего лишь доли секунды. Существует несколько материалов, пригодных для получения таких «постоянных магнитов». Для этой цели подходит большинство сортов закаленной стали. Еще лучше специальные стали, содержащие вольфрам или кобальт. Некоторые новые сплавы, в состав которых входит алюминий, например «алнико», позволяют создавать еще более сильные магниты, однако требуют больших полей для намагничивания. Все эти материалы также можно намагнитить, помещая их на короткое время в магнитное поле. Обращение магнитного поля путем перемены направления тока в катушке меняет и направление намагничивания.

Как размагничивают магниты

Намагниченный стальной брусок можно полностью размагнитить, помещая его внутрь катушки, через которую пропущен *переменный* ток, и затем *медленно* вынимая оттуда. Другой способ — постепенно уменьшать силу переменного тока до нуля с помощью реостата.

Временное намагничивание мягкого железа

Пытаясь намагнитить кусок мягкого железа, т. е. чистого железа, или стали, которая еще не прошла закалку, мы заметим, что добиваемся успеха лишь на то время, пока через намагничи-

вающую катушку идет ток. Если ток выключить, брусок почти полностью потеряет магнитные свойства. Мягкое железо оказывается прекрасным материалом для временного намагничивания, поэтому оно используется для изготовления сердечников электромагнитов в электромоторах и других электромагнитных устройствах.

Мы можем временно намагнитить брусок из мягкого железа, поднося к нему магнит. Если N-полюс магнита находится около конца A бруска AB, то стрелка компаса покажет, что брусок приобрел магнитные свойства, причем его южный полюс оказывается в A, т. е. вблизи N-полюса магнита, а северный — на удаленном от магнита конце B. Если же мы унесем магнит, эти полюсы сразу исчезнут. Теперь вы можете понять, почему ненамагниченные железные опилки притягиваются к магниту. Он намагничивает эти небольшие кусочки железа, но неоднородное магнитное поле оказывает неодинаковое воздействие на их полюсы. Кусочки железа, близкие к северному полюсу магнита, будут иметь на краю, обращенном к магниту, южный полюс, и этот полюс будет сильно притягиваться к магниту. Их северный полюс будет находиться дальше от магнита, т. е. в более слабом магнитном поле. Таким образом, опилки будут сильнее притягиваться к магниту, чем отталкиваться от него [1].

Обобщая эти рассуждения, можно сказать, что магнит притягивает любой ненамагниченный кусок железа, создавая в нем временное намагничивание. Даже маленькая компасная стрелка будет временно намагничивать железный брусок. Будучи более подвижной, чем тяжелый брусок, стрелка будет сама поворачиваться и указывать в его сторону. Ее вращение говорит нам только о том, что как стрелка, так и железный брусок могут намагничиваться и что по крайней мере один из них *уже* намагничен. Следовательно, наблюдая притяжение, нельзя сказать, являются ли магнитами оба тела. Однако такое заключение легко сделать, если мы увидим, что они *отталкиваются*.

---

[1] Аналогичные соображения справедливы и в случае притяжения электрически заряженными предметами небольших кусочков бумаги и т. п. Электрическое поле, создаваемое этими предметами, притягивает и отталкивает заряды, «индуцированные» на кусочках бумаги, создавая как притяжение, так и несколько более слабое отталкивание. Часто заряд, индуцированный на удаленном краю бумажки, стекает на землю, что еще более усиливает эффект. Магниты всегда имеют два (либо ни одного) полюса и один из полюсов никогда не может исчезнуть, как это бывает в случае стекания электрического заряда на землю.

Магнитные и немагнитные материалы

Если попытаться намагнитить образцы из меди, железа, стекла и других материалов, помещая их в соленоид с током, то выяснится, что лишь некоторые из этих образцов обнаруживают магнитные свойства. Такие материалы мы называем магнитными. К ним принадлежат железо, многие железные сплавы, никель. Ряд веществ, как, например, жидкий кислород и некоторые соединения железа, тоже в слабой степени проявляют магнитные свойства, но большинство веществ немагнитно. Основываясь на этом, мы говорим, что немагнитные вещества невозможно намагнитить в противоположность магнитным, и последние, если они намагничены, мы называем магнитами. Более тонкие опыты опровергают это простое правило. Многие вещества при помещении их в магнитное поле обнаруживают слабые временные магнитные эффекты, и мы можем проследить их магнитные свойства вплоть до атомного уровня. Более того, мы в состоянии показать, что некоторые атомы сами являются магнитами, и знаем способ (который будет описан далее), как измерить их магнитные свойства. Даже те немногие металлы, как, например, железо, которым свойственны значительные магнитные эффекты и которые могут служить материалом для постоянных магнитов, также обязаны своими свойствами атомному магнетизму. Их атомы обладают специфической способностью объединяться, при этом атомные магнитики выстраиваются особым образом, создавая прочные постоянные группы. Атомная теория предсказывает также и другие магнитные свойства атомов. Весьма забавно, что результатом этих предсказаний является отрицательный магнетизм, совсем не похожий на тот, с которым мы всегда встречаемся, и теория утверждает, что им, хотя и в очень слабой степени, обладают все вещества. На чем основаны эти предсказания? Достаточно ли они правдоподобны? Наблюдался ли этот отрицательный магнетизм на опыте? Если да, то почему же не для всех веществ? На эти вопросы мы кратко ответим в гл. 41.

Магнитное поле электрического тока

Опыты говорят нам о том, что всякий электрический ток создает вокруг себя магнитное поле. Магнитное поле, окружающее длинную катушку из проволоки, которую часто называют соленоидом, очень похоже на поле намагниченного стержня. При детальном сравнении оказывается, что конфигурации внешних магнитных

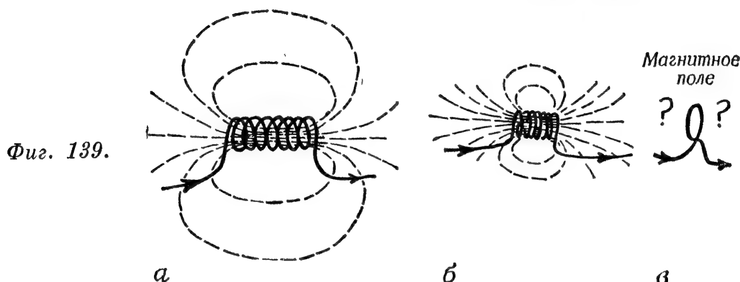
полей такого стержня и соленоида, имеющего ту же форму и размеры, попросту одинаковы. Можно показать, что внутри полой катушки магнитные силовые линии идут плотным параллельным пучком, образуя сильное однородное магнитное поле.

Задача 2

Почему лучше намагничивать стальной стержень, помещая его внутри соленоида с током, а не снаружи?

Задача 3

На чертеже а фиг. 139 изображено магнитное поле длинного соленоида. Если уменьшать длину соленоида, сжимая его, как гармошку, конфигурация поля будет меняться, как показано на чертеже б. Представим себе, что катушка сжата до предела (чертеж в), так что превратилась в один виток. Можете ли вы предсказать, как будет выглядеть магнитное поле витка с током, представив себе характер сжатия силовых линий? Изобразите ожидаемую конфигурацию поля. Согласуется ли она с опытом?



Фиг. 139.

Задача 4

Внешнее магнитное поле соленоида совпадает с полем намагниченного стержня одинаковых размеров и формы. Какую же форму имел бы магнит, создающий такое же поле, как и виток с током в? Нарисуйте или опишите этот эквивалентный магнит.

Магнитные свойства катушки с током

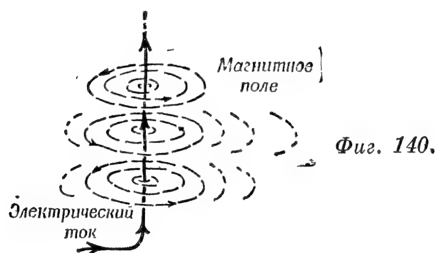
ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ОПЫТ

Катушка с током во всем подобна магниту. Если ее подвесить, она будет поворачиваться до тех пор, пока ее ось не укажет в направлении N—S. Она ведет себя так, как будто имеет на концах «полюсы», ко-

торые притягивают или отталкивают полюсы других магнитов. Небольшая катушка с током, помещенная в магнитное поле Земли, магнита или другой катушки, будет поворачиваться наподобие стрелки компаса, пока ее магнитная ось не станет параллельной внешнему полю.

Магнитное поле прямого провода с током

Есть один особый очень важный случай проводника с током, когда нельзя подобрать эквивалентного магнита одинакового размера и формы. Это случай длинного прямого провода с током. С помощью железных опилок или крошечного компаса можно показать, что магнитные силовые линии такого проводника представляют собой опоясывающие его окружности, расположенные, разумеется, не в одной плоскости, а повсюду вокруг нити. Магнит-



Фиг. 140.

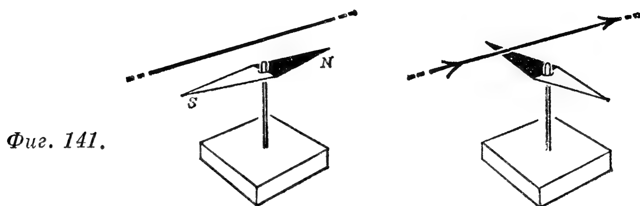
ное поле сильнее вблизи нити и ослабевает с удалением от нее. Этот первый эффект магнитного действия электрического тока был открыт следующим образом. В конце своей лекции о свойствах электрического тока датский ученый Эрстед поместил токонесущий провод около компасной стрелки и был до глубины души изумлен, увидев, что стрелка повернулась. «Опыты, которые он начал проводить в апреле 1820 г., являются одними из самых памятных во всей истории науки» [1]. Когда известие об этом открытии распространилось по Европе, оно породило целую лавину исследований. Ампер и другие ученые, пытаясь объяснить эти опыты, вскоре ввели в физику понятие электромагнитного поля.

Явление, обнаруженное Эрстедом, представлялось крайне удивительным. Компасная стрелка, расположенная параллельно проводнику, при включении тока поворачивалась на 90°. Таким образом, силы действовали на компасную стрелку не в направлении прямой, соединяющей ее полюс с проводником, а в перпен-

---

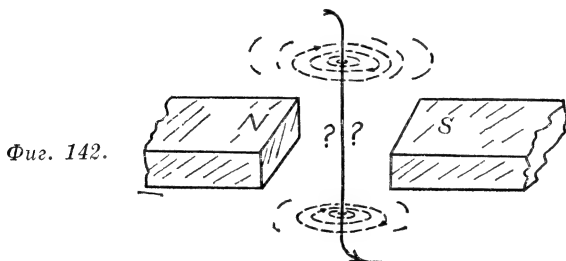
[1] Г. Сартон.

дикулярном направлении. Последующие опыты подтвердили это заключение и показали, что сила, действующая *со стороны магнита на ток*, перпендикулярна как направлению магнитного поля, так и направлению тока — проводник с током, помещенный в магнитное поле, испытывает боковое усилие. Эти новые силы



Фиг. 141.

полностью отличались от уже известных обычных сил, таких, как, например, силы тяготения (направленные по прямой от одной массы к другой) или силы, возникающие при столкновении упругих шаров или молекул (которые отбрасывают их в противоположные стороны), а также силы (притяжения или отталкивания), действующие по прямой между электрическими зарядами и между магнит-



Фиг. 142.

ными полюсами. До открытия Эрстеда были известны только такие силы, которые действуют вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие тела. Незадолго до Великой Французской Революции школа мыслителей, включая Вольтера и других, создала механистическую философию полностью предсказуемой Вселенной, основываясь на концепции таких простых сил. Когда обнаружилось, что новые электромагнитные силы зависят от *скорости* движения электрических зарядов (тока), они стали казаться еще более странными. Это были силы, которые увеличивались с ростом скорости и действовали перпендикулярно ей! Однако именно такие силы заставляют работать электрический двигатель.

Мы можем проиллюстрировать происхождение этих сил с помощью карты магнитного поля. Круговое магнитное поле, окружающее прямолинейный проводник с током, само по себе несколько необычно, но и только. Однако в комбинации с однородным магнитным полем оно создает отклоняющие силы, без которых невозможна работа электродвигателей, измерительных приборов, телевизионных трубок и некоторых гигантских ускорителей заряженных частиц. Чтобы продемонстрировать, откуда возникают эти силы, изобразим магнитные силовые линии с помощью векторов.

Магнитное поле действует как катапульта

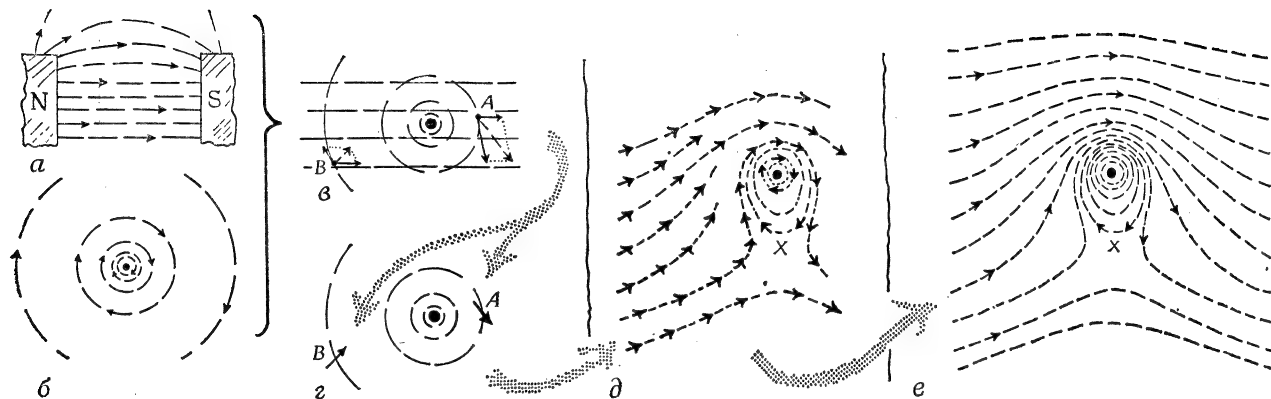
Мы сможем предсказать направление действия результирующей силы, складывая векторы сил, отвечающих двум различным полям. Конфигурация однородного магнитного поля — это ряд равномерно идущих параллельных силовых линий, как показано на фиг. 143, *а*, а силовые линии прямолинейного проводника с током — это окружности, изображенные на фиг. 143, *б*. Мы рисуем эти окружности сгущающимися вблизи проводника, чтобы показать, что поле около него сильнее. (Детальное рассмотрение показывает, что

$$\text{НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ} \sim \frac{1}{\text{РАССТОЯНИЕ ОТ ПРОВОДНИКА}},$$

поэтому мы обязаны рисовать окружности вдвое теснее друг к другу при сокращении расстояния наполовину.) Векторное сложение этих двух полей дает примерно ту же картину, что мы получили в гл. 9 для воздушного потока, обтекающего быстровращающийся шар [1]. Поэтому мы поступим точно так же, как и раньше. Изобразим оба поля вместе, как на фиг. 143, *в*. В некоторой произвольной точке A нарисуем стрелки-векторы, отмечающие напряженности обоих полей, одну в направлении однородного магнитного поля, а другую по касательной к окружности. Сложим эти векторы и *обозначим результирующее направление короткой стрелкой*, выходящей из A. В другой точке B однородное поле не меняется, а поле, создаваемое током, ослабевает. Сложим опять их

---

[1] Картина, возникающая в таком магнитном поле, полностью совпадает с той, которая имеет место при обтекании вращающегося цилиндра однородным воздушным потоком (см. гл. 9). Заметим, однако, что сила действует здесь в обратном направлении.



Фиг. 143. Метод сложения векторов и доказательство выталкивающего действия магнитного поля на проводник с током.

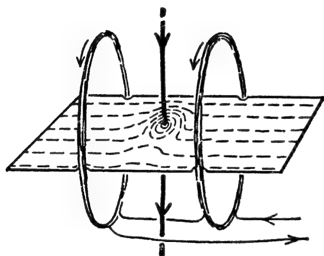
векторы и снова обозначим результирующее направление *короткой стрелкой*, исходящей из B (чертеж *г*). Нанесем множество таких стрелок по всей диаграмме. Они покажут нам направление результирующего поля, которое мы хотели найти. Начертим силовые линии этого поля, проходящие через стрелки (чертеж *д*). Здравый смысл подсказывает нам следующие очевидные выводы:

а) Вблизи проводника преобладает магнитное поле, создаваемое током, и силовые линии суммарного поля практически совпадают с окружностями, в центре которых находится проводник.

б) На больших расстояниях от проводника магнитное поле тока пренебрежимо мало, и силовые линии результирующего поля совпадают с прямыми силовыми линиями однородного магнитного поля.

в) Имеется некоторая нейтральная точка ×, где суммарное поле равно нулю. В этой точке оба поля полностью компенсируют друг друга.

Чтобы правильно начертить конфигурацию результирующего магнитного поля, нужно запастись терпением. К счастью, карту поля можно получить, пользуясь косвенными геометрическими



Фиг. 144. Опыт, демонстрирующий конфигурацию магнитных силовых линий при взаимодействии токов.

методами (основанными на математическом соотношении, которое обычно записывается $\nabla^2 V=0$), и тому, кто их знает, будет легко вычертить ее на нашей диаграмме. Соответствующая картина показана на фиг. 143, *е*.

Если, следуя Фарадею, мы будем видеть в магнитных силовых линиях графическое изображение реальных сил, которые действуют на магниты и проводники с током, то придем к заключению, что результирующее магнитное поле, изображенное на последнем рисунке, будет тянуть проводник *вниз*. Таким образом, здесь мы имеем дело с поперечной силой, перпендикулярной как проводнику, так и направлению однородного магнитного поля. Разглядывая эти картинки, мы можем сказать, что результирующее поле действует наподобие катапульты или рогатки (фиг. 144).

Поперечная (катапультирующая) сила[1]

Действует ли на самом деле эта сила непосредственно на проводник с током, проходящий поперек магнитного поля? Проверьте это на опыте, используя гибкий провод, электрическую батарею и подковообразный магнит. Включайте электрический ток при различных положениях проводника в сильном однородном поле между полюсами магнита. Если ток достаточно велик, то, как мы и ожидали, возникает поперечная сила, смещающая провод в сторону (см. опыт 1 гл. 41). Но для электрического тока не обязательно нужен проводник; он может быть и просто пучком заряженных частиц, например электронов. Такой электронный луч также отклоняется магнитным полем,— этот эффект, широко используемый в практических целях, мы рассмотрим в гл. 37. (Чтобы эффект был сильнее, магнитное поле должно быть перпендикулярно электрическому току или пучку электронов, так как *продольная* компонента поля не оказывает на них никакого влияния.) Испытайте действие намагниченного стержня на электронно-лучевую трубку. Результат этого опыта очень напоминает тот, о котором мы говорили в гл. 9, однако теперь *направление* поперечной *силы* оказалось противоположным направлению силы Бернулли.

Попытки получить отдельный магнитный полюс. Начала теории магнетизма

Вернемся к стальным магнитам и проведем еще один опыт. До сих пор в каждом магните мы всегда находили два полюса. Спросим себя, можно ли отделить северный магнитный полюс от южного наподобие того, как мы поступали с электрическими зарядами[2]. Попытаемся разрезать магнит пополам. Для этого намагнитим кусок стальной проволоки или пружину от часов. Убедимся с помощью железных опилок, что на концах магнита образовались полюсы, а небольшой компас поможет нам определить, где северный полюс, а где южный. Затем с по-

---

[1] Впервые здесь и далее в гл. 37 автор называет силу, действующую со стороны внешнего магнитного поля на помещенный в него проводник с током, а также силу, действующую на движущийся во внешнем магнитном поле заряд, «катапультирующей» (catapult force). В научной литературе принято именовать первую из указанных сил «пондеромоторной силой, действующей на проводник с током, помещенный во внешнее магнитное поле» (силой Ампера), а вторую — силой Лоренца. Тем не менее, желая сохранить стиль оригинала, мы не сочли целесообразным изменить терминологию автора.— *Прим. ред.*

[2] Наведите на концах проводника положительные и отрицательные заряды. Затем разрежьте проводник пополам, и вы получите два разноименно заряженных куска.

мощью ненамагниченных ножниц разрежем магнит посередине и исследуем полюсы каждой половинки. Как бы в насмешку над нашими попытками, в местах разреза возникают новые полюсы. Мы получили просто-напросто два новых магнита. Это необычное свойство магнитов тут же ставит перед нами два новых вопроса:

1) Сколь малые магнитики можно получить, разрезая магнит на все более мелкие части?
2) Почему в месте разреза снова возникают полюсы?

Попытки разобраться в этих вопросах привели к созданию теории магнетизма, одинаково хорошо объясняющей все магнитные явления — от обычных свойств магнитов до важнейших деталей магнитной структуры атомов.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ МАГНЕТИЗМА

Комментируя распространенную шутку о том, что «путь развития науки заключается в наблюдении фактов и пренебрежении теориями», Моррис Коэн писал [1]:

«Если, однако, мы проследим за развитием какого-либо подлинно научного исследования, то станет очевидным, что без определенного ведущего принципа, без научной идеи, гипотезы или теории мы даже не сможем понять, какие факты нам необходимы. Полностью неверно также и то, что мы в состоянии раскрыть природу вещей путем одного только наблюдения. Если бы это было так, то развитие науки оказалось бы гораздо более легким, и занятие ею было бы по силам каждому. Однако в действительности в научном исследовании порой приходится применять очень трудоемкие и искусные методы, чтобы исключить то, что кажется основным для обычного наблюдателя... Теории — это отправные точки или вершины, с которых можно увидеть вещи в их взаимосвязи. Они, как указал Ченси Райт, глаза и уши ученого, необходимые ему, чтобы предвидеть и открывать явления, до поры до времени скрытые».

«Конечно, теории оказывают на нас определенное психологическое давление, которое заставляет цепляться за них, несмотря на противоречащие им факты, но разве с меньшим упорством цепляемся мы за наши взгляды в повседневной жизни? В этой связи следует отметить два обстоятельства. Во-первых, в науке, как и в любом другом виде человеческой деятельности, мы не можем обойтись без твердой точки зрения. То, что представляется противоречащим нашей теории, при тщательной проверке может, наоборот, оказаться ее подтверждением или следствием...»

«Второе, и самое важное, обстоятельство заключается в том, что научная гипотеза обычно отвергается только в том случае, когда становится очевидным, что другая гипотеза лучше согласуется как со всеми предыдущими наблюдениями, так и с новыми фактами. Таким образом, путь к настоящему познанию состоит не в том, чтобы избегать теорий и предвидения, а в том, чтобы систематически умножать их число. Это позволит нам иметь несколько различных точек зрения и предохранит нас от излишней уверенности в правоте какой-либо одной из них. Вот почему логические или математические методы в физике, химии, общей биологии и других теоретических науках столь плодотворно помогают нам открывать еще неизвестные факты».

[1] Morris R. Cohen, The Faith of a Liberal, Henry Holt and Company, N. Y.

Как построить теорию?

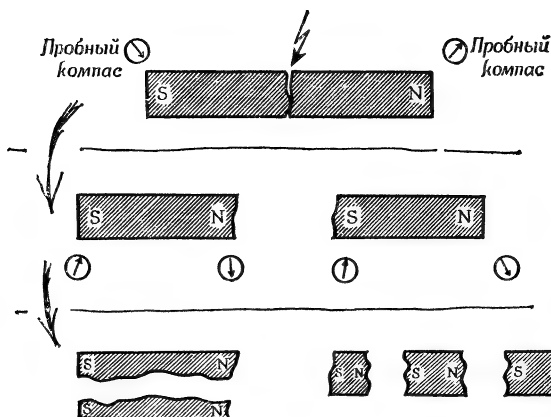
Какую же теорию магнетизма хотели бы мы построить? Прежде всего нам нужна теория, способная объяснить результаты наших опытов и помочь лучше понять природу магнетизма, служа нам как бы справочником понятий и идей. В предыдущих разделах мы рассказали об общих свойствах магнитов, которые были получены в результате опытов и большинство которых известно уже несколько веков [1]. Мы едва ли могли бы создать полезную для себя теорию, не основываясь на фактах, почерпнутых из опыта. Конечно, можно было бы начать и с таких утверждений: «Магниты *таковы, какие они есть.* Что бы ни содержалось внутри магнитов, это как раз то, что необходимо, чтобы обеспечить им нужные свойства. Стали присущ «магнитотропизм», т. е. способность к магнетизму. Это и есть моя теория магнитов». Подобная теория была бы безусловно «правильной», но совершенно бесполезной, и разумный исследователь не стал бы терять на нее время [2]. Итак, мы начнем с простой теории, объясняющей, почему у магнитов есть полюсы. Магнитный полюс — это не экспериментальный факт, это представление, искусственная идея, которой мы пользуемся, когда интерпретируем свои опыты. В ходе этих опытов мы приходим к выводу, что на самом деле полюсов не существует. Однако это не может само по себе разрушить нашу простую теорию Мы будем придерживаться ее до тех пор, пока она не перестанет нам служить. Представление о полюсах обогащает наш словарь, но оно не в состоянии подсказать нам новые опыты или позволить лучше понять суть дела. Так что, не отказываясь от термина «магнитный полюс», давайте все же поищем лучшую теорию. Сейчас мы уже вооружены некоторым опытом и можем отважиться на смелые предположения. Попытаемся же построить некоторую общую схему или картину и сделаем из нее в свою очередь новые заключения, которые подвергнем затем проверке опытом.

«Молекулярная» теория магнетизма

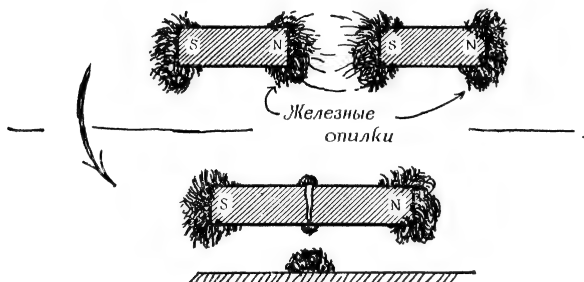
Вы, очевидно, помните, что многие химические, электрические и даже некоторые механические свойства веществ можно объяс-

[1] За поколение до Галилея английский физик Гильберт написал замечательную книгу о магнетизме и электричестве. В ней он не только изложил результаты своих опытов, но и высказал ряд правильных предположений, в частности сравнивал Землю с намагниченным шаром.

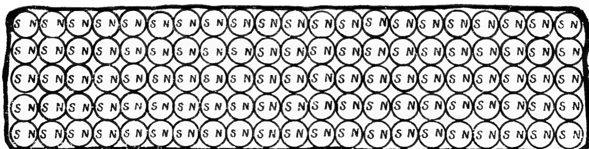
[2] Тем не менее в некоторых других областях знаний к подобным утверждениям относятся с уважением.



Фиг. 145. Образование новых пар полюсов при разрезании или разламывании магнита.



Фиг. 146. Новые полюсы почти полностью исчезают при сближении половинок магнита.



Фиг. 147. Модель, иллюстрирующая предположение об элементарных магнитиках.

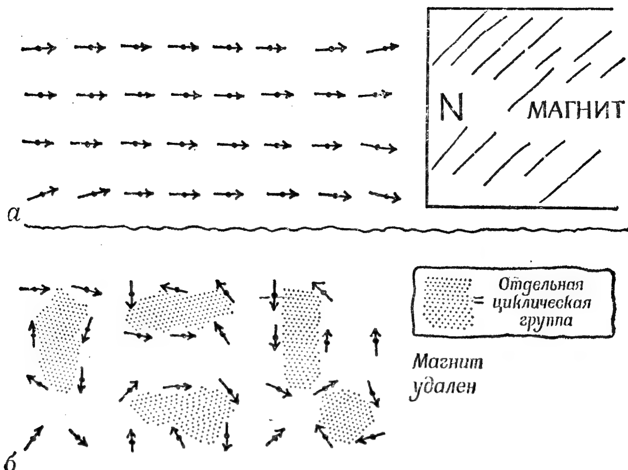
Можно представить, что магнит составлен из мельчайших «элементарных магнитиков», расположенных, как показано на фигуре. Полюсы соседних магнитиков взаимно нейтрализуют друг друга повсюду, кроме краев магнита.

нить исходя из их атомного строения. Поэтому мы вправе спросить себя: связаны ли свойства магнитов со специфическим поведением составляющих их атомов или молекул? Задав этот вопрос, сразу же проведем опыт. Попробуем разломать магнит, чтобы узнать, что у него внутри. В глубине души мы питаем надежду, разрезав магнит пополам, отделить друг от друга его северный и южный полюсы. Однако наш опыт дает неожиданный результат. В месте излома возникает пара разноименных полюсов, так что каждый из двух кусков представляет собой новый самостоятельный магнит. Если мы разломаем магнит осторожно, без сотрясения, то увидим, что сила, с которой полюсы притягивают железные предметы, осталась прежней, т. е. новые полюсы ни в чем не отличаются от старых. Можно разрезать магнит на очень большое число кусков, и каждый из них также останется магнитом. Если мы попытаемся снова составить эти куски друг с другом, то едва только их края придут в соприкосновение, новые полюсы как будто исчезнут. Можно думать, что на самом деле они не исчезли, а просто не дают внешнего магнитного поля, поскольку их поля противоположны и практически нейтрализуют друг друга. Продолжая мысленно разрезать магнит на все более и более мелкие части, мы убедимся, что нам придется остановиться на той стадии, когда мы поделим его на мельчайшие «элементарные» магнитики. Примерно сто лет назад считалось, что ими являются как раз молекулы или атомы железа. Сейчас мы склонны думать, что эти магнитики составлены из групп атомов, по многу миллионов в каждой, которые называются «доменами» и видимы в микроскоп. Но пока мы скажем о них только то, что они представляют собой очень маленькие и крайне многочисленные простейшие магнитики, поэтому можно вообразить себе магнит разрезанным на множество таких крошечных элементарных магнитов. Составив их вместе, чтобы получить один большой магнит, мы бы заметили, что эти магнитики выстроились таким образом, что северный полюс одного примыкает к южному полюсу соседнего, так что их внешние поля взаимно компенсируются всюду, кроме концов магнита. Там на одной торцевой плоскости наружу будут обращены все N-полюсы, а на другой — S-полюсы элементарных магнитиков. Таким образом, можно, если хотите, представить себе, что обычный магнит заполнен выстроенными подобным образом маленькими магнитиками, хотя пока в такой сложной картине еще мало пользы. Мы можем даже построить модель такого магнита, состоящую из большого числа маленьких компасных стрелок, которые при наложении внешнего магнитного поля выстраиваются в опреде-

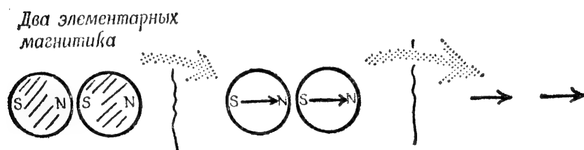
ленном направлении. В такой модели стрелки остаются выстроенными, пока имеется магнитное поле. При его выключении они довольно сложным образом перестраиваются, стремясь образовать замкнутые циклические группы из нескольких стрелок, направленных друг за другом. Эта модель годится и для ненамагниченного железа или стали: магнитное поле находящихся внутри них элементарных магнитиков не подавлено, но сами магнитики расположены неупорядоченно, причем не хаотически, а скорее циклическими группами.

Давайте внимательно подумаем над этой идеей, чтобы понять, сможет ли она послужить основой плодотворной теории. Будем считать, что магнитный материал состоит из бесчисленного множества элементарных магнитиков, которые в намагниченном бруске упорядочены, а в ненамагниченном находятся в беспорядке. Опыты показывают, что мягкое железо с легкостью намагничивается и так же легко размагничивается, а закаленные стали требуют более сильных полей для намагничивания, а затем частично сохраняют свою намагниченность, становясь постоянными магнитами. Поэтому мы должны предположить, что в мягком железе элементарные магнитики способны легко поворачиваться, а в твердой стали они крепко сцеплены с соседними, испытывая с их стороны сопротивление, сходное с трением. Чем же может нам помочь эта простая картина? Прежде всего мы видим, что она объясняет появление новых полюсов при делении магнита на части. Если только мы не разрушим при этом сами элементарные магнитики, то в месте разреза обязательно возникнут новые полюсы. Однако такое объяснение вовсе нельзя считать большим успехом. Наша теория просто объяснила те же самые экспериментальные факты, от которых она отталкивалась, иными словами, выдала нам ту же самую информацию, которая была в ней заложена. Больше того, она высказала без каких-либо оснований утверждение, что сами элементарные магнитики невозможно разделить пополам. Содержится ли подобное утверждение в их определении? Если мы приписываем им такое свойство, то это еще не означает, что они обладают им в действительности.

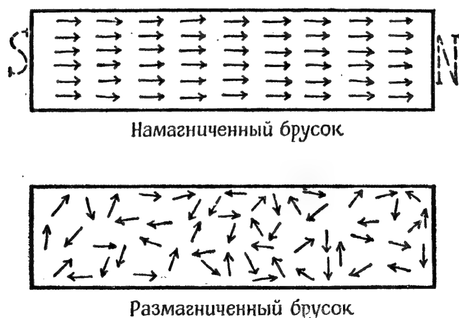
В настоящее время мы объясняем природу магнитов с помощью предложенных Ампером молекулярных электрических токов. Мы приписываем происхождение магнетизма атомным электронам, обладающим собственным вращением и движущимся по замкнутым орбитам в атомах. Такие замкнутые токи образуют магнитное поле, аналогичное полю витка с током, и, конечно, их невозможно разделить на отдельные «полюсы».



Фиг. 148. а — компасные стрелки выстроены большим магнитом; б — те же самые стрелки после сотрясения, вызывающего их перестройку в отсутствие магнитного поля.



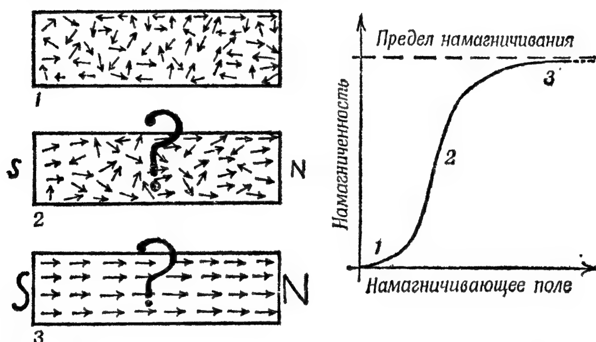
Фиг. 149. Упрощенное изображение элементарных магнитиков.



Фиг. 150. «Элементарные магнитики» в стальном бруске.

Однако этот первый успех теории пока что не может нас удовлетворить. Если бы все ее содержание заключалось только в объяснении того, как возникают полюсы магнитов, то от нее было бы мало проку. Ценность всякой теории состоит в том, что она способна дать исчерпывающие ответы на новые вопросы, которые мы и рассмотрим ниже.

1. *Существует ли предел намагничивания?* Мы умеем создавать электрические токи огромной силы, и если отвлечься от нагрева проводника, то их дальнейшее увеличение ничем не ограничивается. Может ли при этом намагниченность железного стержня повышаться беспредельно? Наша теория сразу же отвечает на



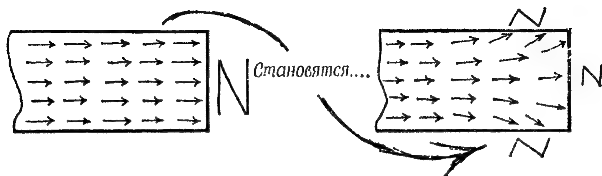
Фиг. 151. Стадии намагничивания железного бруска.

График показывает запись, полученную в результате опыта. Схемы с элементарными магнитиками иллюстрируют представления простейшей теории магнетизма. Более современная точка зрения о существовании «доменов» объясняется на фиг. 162.

этот вопрос: «Нет, не может. Когда все элементарные магнитики выстроятся одинаковым образом, то будет достигнут предел намагничивания». Это вполне определенное предсказание легко проверить на опыте. Результаты такого опыта изображены на фиг. 151. Как мы видим, предел намагничивания наблюдается в действительности.

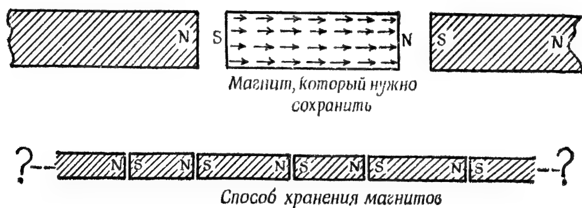
2. *Где расположены полюсы?* Мы уже знаем, что стержень из твердой стали сохраняет магнитные свойства, даже если убрать намагничивающее поле. Зададим вопрос: «Остаются ли при этом его полюсы точно на концах магнита?» Теория отвечает нам: «Нет, элементарные магнитики на концах стержня как бы развернуты, так как впереди них нет других таких же магнитов, взаимодействие с которыми выстроило бы их в одну линию. Одноименные

полюсы на торцевой поверхности стержня будут отталкивать друг друга, благодаря чему некоторые из них сдвинутся к боковым граням» (фиг. 152). Опыт подтверждает, что полюсы намагниченного стального бруска действительно несколько «размазаны» (проверьте это свойство намагниченного бруска с помощью железных опилок или компаса).



Фиг. 152. Полюсы могут «размазываться» у краев магнита.

3. *Как сохранять магниты?* Сказанное выше заставляет нас задуматься над тем, как предотвратить «размазывание» полюсов и, что было бы еще хуже, полную потерю намагниченности стержня. Теория с готовностью подсказывает нам нужный ответ. Если впереди нашего магнита положить другой магнит так, как



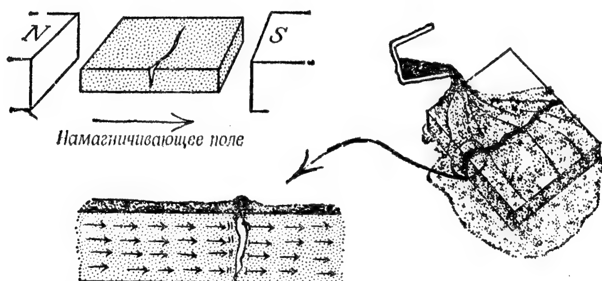
Фиг. 153. Способ сохранения полюсов на торцевых плоскостях магнита.

показано на фиг. 153, то это поможет сохранить одинаковую ориентацию всех элементарных магнитиков. Способ хранения магнитов, расположенных цепочкой друг за другом, оказывается очень удобным. Однако и он не решает задачи: что делать с магнитами, расположенными на краях такой цепочки?

4. *Что происходит с магнитом при ударе молотком?* Магниты не терпят грубого обращения и теряют свои свойства при резких ударах молотком, нагревании и т. п. (см. соответствующий опыт). Можно ли это чем-нибудь объяснить? «Да»,— говорит теория и

четко указывает на то, что причина этого заключается в нарушении порядка в расположении элементарных магнитиков. «Как только мы устраним намагничивающее поле, элементарные магнитики будут стремиться перестроиться в циклические группы, однако взаимное сцепление мешает их перестройке, благодаря чему намагниченность частично сохраняется. Любое же сотрясение дает им возможность перейти из упорядоченного состояния в неупорядоченное». Все это, конечно, хорошо, но, как и в большинстве теоретических объяснений, здесь только раскрывается «причина» того, что мы уже знаем. Давайте заглянем несколько глубже и спросим себя: «*Можно ли намагнитить* брусок, *ударяя по нему молотком, даже если сам молоток изготовлен из немагнитного материала?*» Без помощи теории мы едва ли смогли бы ответить на этот вопрос, а попытки решить его экспериментальным путем тоже вряд ли привели бы к успеху. Теория же четко отвечает нам, что *в определенных условиях* это возможно, а опыты подтверждают это предсказание. (Какие это условия? Если вы отгадали правильно, то сможете сами убедиться в своей правоте. См. соответствующий демонстрационный опыт.)

5. *Поиски трещин в стальных отливках.* Несмотря на наше пренебрежительное отношение к первому теоретическому предсказанию, согласно которому в том месте, где мы разломали магнит,



Фиг. 154. Проверка стального литья на трещины.

На намагниченную отливку наносится смесь масла с железным порошком. Частички железа собираются в складки вдоль трещин, где проявляется действие разноименных магнитных полюсов.

появляются новые полюсы, оно получило полезное практическое применение. Инженеры находят в стальном литье не видимые глазом трещины, намагничивая отливку и затем поливая ее смесью железного порошка с маслом. Теория говорит нам, что около тре-

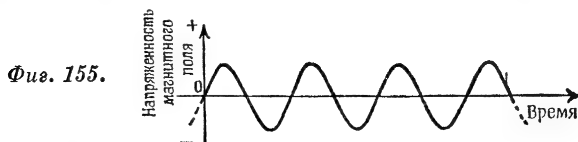
щин на поверхности намагниченного материала должны появиться полюсы. Благодаря этому железный порошок будет собираться вдоль края трещин в небольшие складки — длинные выпуклые бугорки, напоминающие широкий мостик через канаву. Такой способ прекрасно помогает находить мельчайшие трещинки в стальном литье (фиг. 154).

6. *Намагничивание переменным током.* Мы можем намагнитить брусок в одном направлении, затем в обратном, снова в том же направлении и т. д., помещая его внутрь соленоида с переменным током [1]. Обнаружим ли мы какую-либо разницу в поведении брусков из мягкого железа и твердой стали? Теория говорит нам: «Поскольку элементарные магниты в твердой стали, по-видимому, испытывают при переориентации сильное сопротивление, сходное с трением, мы можем ожидать, что стальной брусок при перемагничивании будет значительно сильнее нагреваться, чем брусок из мягкого железа». При проверке такого предсказания на опыте этот эффект часто маскируется другими, но он, безусловно, имеет место и очень важен с технической точки зрения. Катушки электромоторов и генераторов наматываются на железные сердечники. Если через эти катушки пропускается переменный ток, то необходимо, чтобы сердечники были изготовлены из мягкого железа. В противном случае сердечники будут нагреваться, подвергая опасности изоляцию проводов и бесполезно растрачивая энергию. В машинах постоянного тока сердечник ротора также попеременно намагничивается в различных направлениях, поэтому он должен быть изготовлен из мягкого железа.

7. *Важнейшие достижения теории.* Итак, теория помогла нам сделать важные заключения, часть которых попросту совпала с уже известными нам фактами, а другая легко проверяется опы-

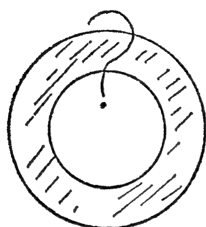
[1] Обычное переменное напряжение возрастает до максимума, затем падает до нуля, достигает максимума противоположного знака, снова возрастает и т. д., делая 60 полных циклов в секунду. Если приложить такое переменное напряжение к катушке, то через нее потечет переменный ток,

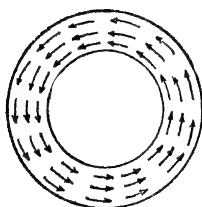
Фиг. 155.



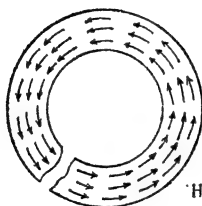
который создаст магнитное поле, меняющееся с той же частотой. (Частота 60 циклов в секунду принята в США. В СССР и европейских странах стандартная частота переменного тока равна 50 циклам в секунду.— *Прим. перев.*)

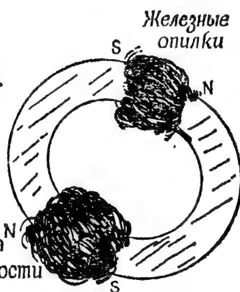
том. Теперь мы в состоянии получить ответ на очень трудный вопрос — ответ, который является, пожалуй, одним из самых значительных успехов теории. *Предположим, что кто-то пытается намагнитить стальное кольцо. Можно ли считать, что он добился своей цели, если не обнаруживается ни полюсов, ни внешнего магнитного поля? Можно ли считать кольцо намагниченным в разумном смысле этого слова?*











Фиг. 156. Вопрос к теории магнетизма.

Если забыть про теорию магнетизма, то последует немедленный ответ: «Это невозможно». «Когда нет полюсов, нет и магнита». Но, вспомнив теорию, мы сделаем уже совсем иное заключение: «*Да, кольцо можно намагнитить, так что силовые линии замк-*

нутся, а элементарные магнитики выстроятся друг за другом по кругу». Такой вывод является выдающимся успехом теории. Она дает нам возможность понять то, что нельзя было бы постичь другим способом.

Одним из важнейших достижений теории является то, что она придает физическому понятию или идее, в нашем случае — намагниченности, новый смысл. При этом она поднимается выше своей обычной роли толкователя известных или предсказателя новых фактов и становится способной проникать в самую суть явлений. Такая теория приводит к существенно более глубокому пониманию фактов и заслуживает похвалы, адресованной киплинговскому слоненку: «Ты не смог бы сделать *всего этого*, будь у тебя обычный короткий нос». Немногие теории сумели подняться на такую высоту — или лучше сказать, немногие сумели продемонстрировать свои успехи столь четко, как теория магнетизма [1].

«Намагниченность кольца,— продолжает теория,— можно проверить, разрезав его. Если оно действительно намагничено, то в месте разреза появятся полюсы». Такой опыт несложно выполнить, и, если кольцо было приготовлено надлежащим образом, мы действительно обнаружим полюсы, создающие сильное магнитное поле.

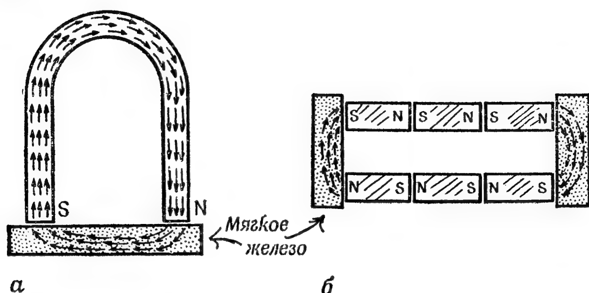
Подобные кольцевые магниты в наше время весьма распространены и очень важны для техники, хотя они изобретены вовсе не с целью проверки теории. Железные сердечники трансформаторов также часто конструируются в виде замкнутых колец, чтобы в них создавались замкнутые силовые линии. Такой характер намагничивания очень существен для хорошей работы трансформатора, а сами трансформаторы необходимы в современной технике для передачи электроэнергии на расстояние. Несколько позже мы узнаем еще об одной возможности проверки намагниченности кольца, которая вовсе не требует разрезания его на части.

8. Теперь мы можем вернуться к вопросу о способе сохранения магнитов. Подковообразные магниты часто снабжаются «башма-

---

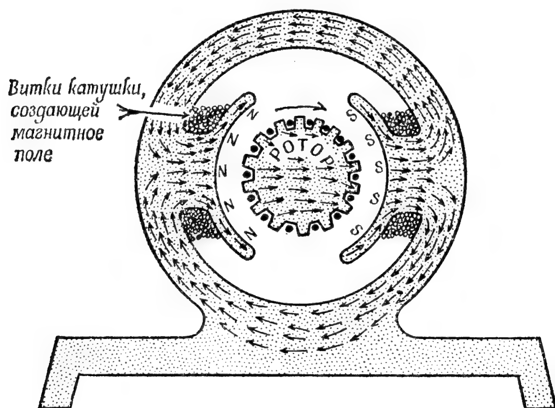
[1] В этом грубая теория магнетизма похожа на теорию химической структуры в органической химии, которая позволяет нам ответить на, казалось бы, бессмысленные вопросы о количестве соединений, обладающих одинаковым составом, но различными химическими свойствами. Так, с помощью бензола C_6H_6 можно получить дихлорбензол $C_6H_4Cl_2$. Если мы спросим: «Сколько может быть *различных* дихлорбензолов?» — то без знания структурной химии вопрос покажется глупым; но эта теория незамедлительно отвечает: «Три». И действительно, их существует три. Теория дает даже нечто большее — она показывает нам, как опытным путем определить, с *каким* из трех веществ мы встретились в исследуемом чистом образце.

ком» — бруском мягкого железа, который замыкает их полюсы. Такие же «башмаки» используются и для сохранения свойств прямых магнитов. В обоих случаях магниты создают в мягком



Фиг. 157. «Башмаки» из мягкого железа.

железе временное намагничивание, и, что очень существенно, возникает замкнутое намагниченное кольцо, аналогичное рассмотренному выше. Основываясь на нашей теории, мы вправе ожидать, что «башмак» действительно должен давать полезный эффект.



Фиг. 158. Магнитные силовые линии в статоре электромотора, изготовленном из мягкого железа.

Вообще говоря, схемы с изображением различным образом выстроенных элементарных магнитиков помогают нам понять состояние намагниченности материала самых разнообразных об-

разцов. Однако не следует забывать, что, хотя эти картинки выглядят весьма правдоподобно, они все же далеки от реальной действительности.

Задача 5. Вопросы по теории магнетизма

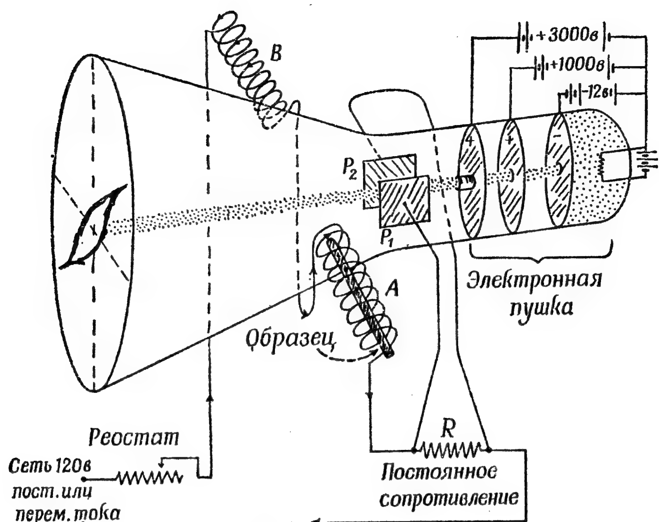
а) *Опишите, что произойдет, когда, пытаясь получить изолированные «полюсы», вы разрежете намагниченный стальной брусок на небольшие куски. Воспользовавшись маленькими стрелками для обозначения элементарных магнитиков, или, точнее, доменов, которые в настоящее время считаются основными элементарными единицами магнетизма, покажите, как этот эксперимент подтверждает «теорию» магнетизма.*

б) *Нарисуйте схемы, иллюстрирующие образцы из намагниченной и ненамагниченной стали, и покажите, как представление об элементарных магнитиках согласуется с результатами опыта по разделению магнита на части.*

в) *Какое различие в поведении элементарных магнитиков мягкого железа и закаленной стали может объяснить разницу в наблюдаемых свойствах образцов из этих материалов?*

г) *С помощью теории прокомментируйте каждый из следующих вопросов. Ответы, где это возможно, дополните схемами.*

1) *Имеется ли предел намагниченности стального бруска?*
2) *«Полюсы» намагниченного бруска не расположены точно на его краях и не распределены точно по торцевой плоскости. Объясните, почему.*
3) *Нагревание магнита приводит к его размагничиванию. Объясните, по какой причине.*
4) *Удары молотком по магниту приводят к его размагничиванию. Дайте объяснение.*
5) *В некоторых условиях удары по стальному бруску могут намагнитить его, даже если молоток сделан из немагнитного материала. В каких условиях это возможно? Объясните.*
6) *Когда намагниченные бруски хранятся в коробке, их располагают таким образом, чтобы концы замыкались «башмаком». Могут ли эти «башмаки» действительно помочь сохранить магниты в намагниченном состоянии? Из какого материала они должны быть изготовлены?*
7) *Подковообразные магниты также снабжают «башмаками». Нарисуйте схему, иллюстрирующую роль последних.*
8) *Экспериментатор считает, что намагнитил стальное кольцо, хотя не в состоянии обнаружить полюсов, а около кольца нет внешнего магнитного поля. Имеется ли какой-нибудь разумный смысл в утверждении, что кольцо «намагничено»? Объясните.*
9) *Если на предыдущий вопрос вы ответили утвердительно, то покажите, как можно проверить намагниченность кольца.*
10) *Брусок из стали или мягкого железа помещен в катушку с переменным током. Замечено, что брусок нагрелся. Такое нагревание возникает благодаря ряду эффектов, один из которых заключается в перемагничивании бруска магнитным полем переменного тока. Какое ожидается различие в нагревании мягкого железа и твердой стали?*
11) *Магнит помещен внутрь катушки с переменным током, и сила тока медленно падает до нуля. Объясните, почему таким способом можно размагнитить магнит. Ответ проиллюстрируйте рисунком или чертежом.*



Фиг. 159. Демонстрационный прибор для изучения намагничивания железных или стальных образцов.

Образец помещается в намагничивающую катушку A, через которую пропускается электрический ток. В процессе намагничивания образец создаст магнитное поле, которое отклоняет электронный луч вверх или вниз. (Катушка A также создает внешнее магнитное поле. Чтобы предотвратить действие этого поля на электронный луч, с другой стороны электронно-лучевой трубки помещается «компенсирующая» катушка B, через которую проходит тот же самый ток. Магнитное поле этой катушки нейтрализует поле катушки A в области, где проходит электронный луч.)

Перемещение луча вверх и вниз позволяет следить за изменением намагниченности образца. Электронный луч отклоняется также вправо и влево электрическим полем между пластинками P_1 и P_2, связанными с сопротивлением R, через которое проходит намагничивающий ток. Согласно закону Ома, разность потенциалов на его концах изменяется в соответствии с силой тока. Так же меняется и поле, действующее на образец. Поэтому величина горизонтального отклонения луча является мерой напряженности намагничивающего поля. Таким образом, *электронный луч вычерчивает график намагничивания (вертикальное отклонение) в зависимости от величины намагничивающего поля (горизонтальное отклонение).*

Если катушка питается постоянным током, который постепенно увеличивают с помощью реостата, то возрастание намагниченности образца можно заметить по смещению светящегося пятна на экране трубки. Если же катушка включена в сеть переменного тока, то достаточно держать реостат в одном определенном положении. Во время каждого цикла намагничивания электронный луч вычерчивает одинаковые кривые, и это происходит так быстро и столь часто, что мы видим на экране неподвижное изображение.

Экспериментальное изучение стадий намагничивания

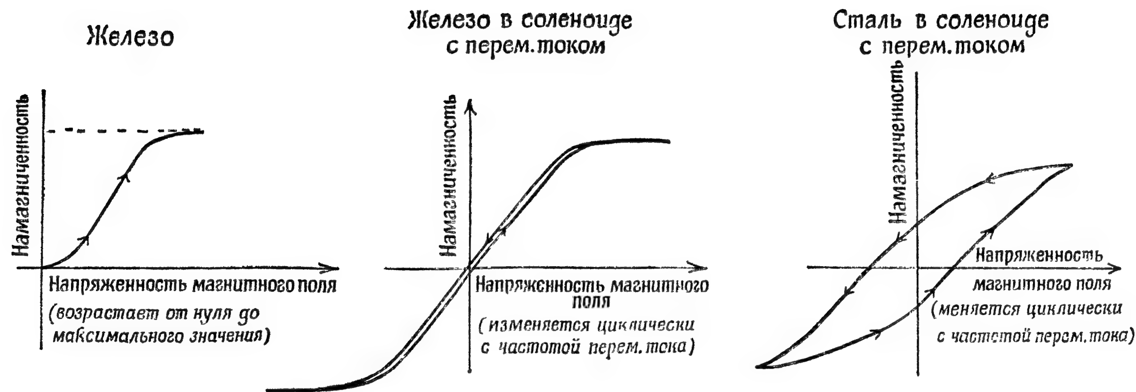
Мы можем исследовать, как намагничивается металлический брусок, поместив его внутрь соленоида и постепенно увеличивая ток в обмотке. Будем считать, что напряженность магнитного поля внутри соленоида прямо пропорциональна току (почему это так, объясняется ниже), так что величину силы тока можно принять за меру напряженности намагничивающего поля. Величину же *намагниченности* самого бруска будем измерять по производимому им действию на небольшую компасную стрелку или пучок электронов в электронно-лучевой (осциллографической) трубке. Мы можем плавно менять ток с помощью реостата или включить соленоид в сеть переменного тока, который 60 раз в секунду будет менять намагниченность бруска. Подадим на вертикальные пластины осциллографической трубки *электрическое поле*, пропорциональное величине намагничивающего тока, которое развернет электронный луч горизонтально 60 раз в секунду, а намагничиваемый брусок расположим таким образом, чтобы его магнитное поле в то же самое время отклоняло бы электронный луч вверх или вниз в зависимости от направления намагничивания. При этом электронный луч вычертит на экране трубки замкнутую кривую, представляющую собой график намагничивания нашего бруска, в котором величина горизонтального отклонения отвечает напряженности магнитного поля, а вертикальное отклонение соответствует намагниченности.

Если проводить опыт с первоначально ненамагниченным образцом, то при увеличении тока в соленоиде график намагничивания мягкого железа будет представлять собой кривую, в которой различаются три участка.

1) При малых напряженностях магнитного поля возникает небольшая (пропорциональная?) намагниченность.
2) С увеличением поля кривая изгибается и начинает расти гораздо более круто, причем в средней области изменению магнитного поля соответствует значительно большее, чем раньше, возрастание намагниченности.
3) При еще больших полях кривая достигает насыщения, которое и является пределом намагничивания.

В переменном поле мягкое железо намагничивается до насыщения, затем намагниченность падает до нуля, снова достигает насыщения, но уже в обратном направлении и т. д. Закаленная же сталь дает характерную петлю, т. е. кривую, прямая и обратная ветви которой не совпадают друг с другом. Образец частично сохраняет намагниченность даже тогда, когда само намагничивающее поле упало до нуля. Такая инерция намагниченности по отношению к намагничивающему полю носит название «гистерезис». Чем больше петля, тем сильнее «трение», которое испытывают крошечные элементарные магнитики, тем значительнее нагревание образца в каждом цикле намагничивания.

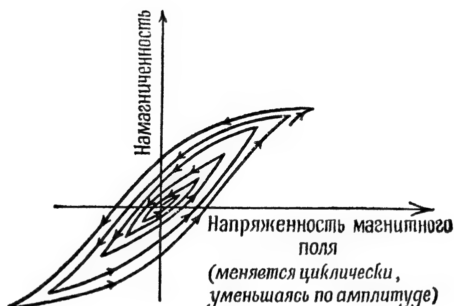
Теперь вам понятно, почему намагниченный брусок размагничивается, когда его помещают в соленоид с переменным током и медленно вынимают оттуда. Переменное магнитное поле 60 раз в секунду меняет намагниченность бруска. По мере извлечения магнита из соленоида он испытывает все более и более слабое воздействие намагничивающего поля, так что петля намагниченности становится все меньше и меньше. Цикл за циклом эти петли сжимаются (так что вся картина становится похожей на разрезанную луковицу) до тех пор, пока они не сойдутся в точку в центре графика, что соответствует полному размагничиванию.



Фиг. 160. Кривые намагничивания.

Более современная теория. Магнитные домены

До сих пор мы не делали никаких определенных предположений о размерах элементарных магнитиков и не сказали ни слова о том, как они выглядят. В последние годы были получены убедительные доказательства, что эти магнитики представляют собой не отдельные молекулы, а довольно большие группы металлических кристаллов. Эти группы, получившие название «домены», выглядят очень маленькими, когда рассматриваешь их под микроскопом, но в сравнении с отдельными атомами они кажутся колоссальными скоплениями. Конечно, домены можно разделить на еще меньшие магнитики и постепенно дойти до отдельных атомов. Так что настоящими элементарными



Фиг. 161. Размагничивание стального бруска.

магнитиками мы по-прежнему должны считать атомы[1]. Границы домена можно увидеть в микроскоп, если посыпать поверхность намагниченного предмета очень тонким железным порошком, точно так же как при проверке литья на трещины.

Весь металл внутри домена намагничивается только в одном направлении — обычно вдоль одной из главных кристаллических осей. В ненамагниченном металле намагниченность отдельных доменов равновероятно направлена по или против любой из осей кристалла, по-видимому, образуя пространственные циклические доменные семейства. При намагничивании металла происходят следующие два типа изменений:

а) Некоторые домены увеличиваются в размере за счет соседних, добавляя в свой единый блок атомы из других блоков. Растут как раз те домены, которые были намагничены в направлении, близком к направлению намагничивающего поля. Если поле слабое, то эти изменения невелики и обратимы: вся картина целиком восстанавливается при снятии поля (стадия *1* на фиг. 162).

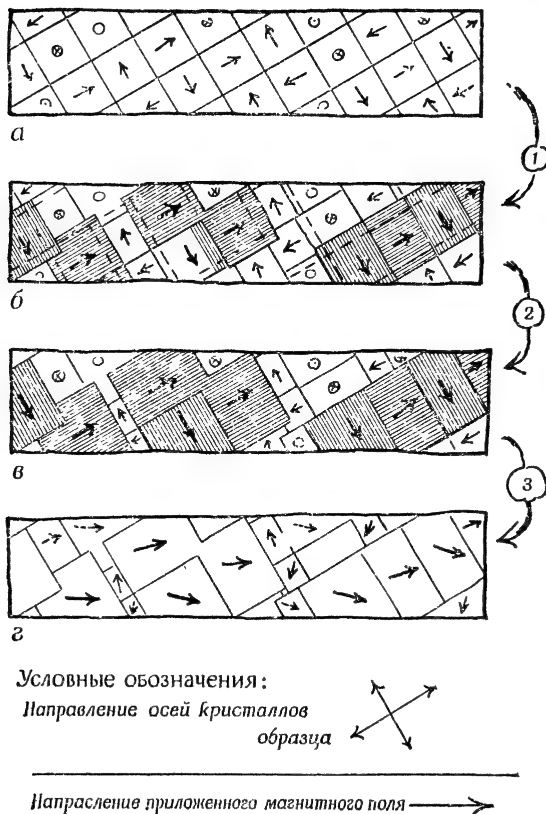
Более сильные поля производят необратимые изменения границ доменов. Удачно ориентированные домены вырастают в размерах еще больше, и мы получаем сильный магнит (стадия *2*).

б) В сильном магнитном поле намагниченность доменов лишь приблизительно следует направлению поля. Напомним, что намагниченность доменов

---

[1] «Домены можно сравнить с человеческими нациями: мы всегда видим людей объединенными в нации, но первичные единицы человечества — это всегда отдельные люди».— Фредерик Кеффер.

направлена вдоль осей кристаллов металла, а не внешних контуров металлического бруска, которые указывают лишь направление наиболее просто осуществимого намагничивания. Атомы домена, естественно, стараются выстроиться в наиболее удобном для них направлении. Однако приложенное



Фиг. 162. Магнитные домены в металлическом бруске на различных стадиях намагничивания.

Это упрощенное схематическое изображение иллюстрирует механизм изменений, происходящих с доменами. Обозначения направления намагниченности, перпендикулярной плоскости чертежа: ⊙ — намагниченность направлена на наблюдателя; ⊗ — намагниченность направлена от наблюдателя.

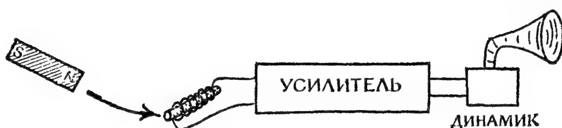
внешнее поле может оказаться не параллельным ни одной из кристаллических осей. Тогда требуются очень большие поля, чтобы повернуть направления

намагниченности удачно ориентированных доменов ближе к направлению магнитного поля (стадия *3*).

в) В некоторых случаях отдельные домены могут внезапно перестраивать направление своей намагниченности от менее благоприятного к более благоприятному. Такой характер изменения менее прост, чем мы привыкли думать.

А что же в действительности?

Привлекая все новые и новые предположения (в форме подробных рассказов о доменах) для объяснения наблюдаемых явлений, мы, кажется, снова рискуем испортить свою научную репутацию. Однако для защиты нашей точки зрения обратимся к экспериментальным наблюдениям узоров, образованных железным порошком

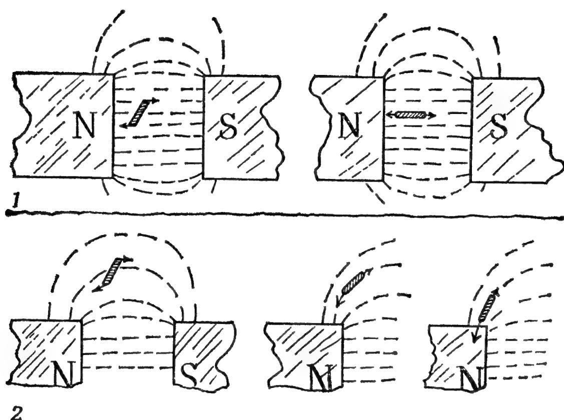


Фиг. 163. Опыт, позволяющий услышать изменения доменов.

на поверхности намагниченного образца, которые показывают границы между доменами. Можно заметить, что эти узоры меняются по мере намагничивания бруска, демонстрируя увеличение одних доменов за счет других. Кто видел это, тот, безусловно, согласится, что опыт подтверждает нашу теорию.

Известна и другая замечательная демонстрация изменений, происходящих с доменами, которые слишком малы, чтобы их можно было бы увидеть непосредственно, но хорошо регистрируются электрическими методами. Намотаем вокруг железного образца небольшую катушку и присоединим ее концы к усилителю, чтобы обнаружить очень слабые изменения наведенного потенциала, связанного с изменением намагниченности образца. Кроме того, к выходу усилителя подключим громкоговоритель. Начнем намагничивать образец, приближая к нему магнит, и мы услышим странный шорох, напоминающий шум песка, падающего на барабан. В действительности этот шорох представляет собой быструю последовательность коротких щелчков, как раз таких, какие можно было бы ожидать от бесчисленного множества доменных скачков. Если бы в намагничивании участвовали не домены, а отдельные молекулы, то щелчки были бы *неизмеримо* слабее и слишком частыми, чтобы произвести такой шум. Таким образом, этот хорошо различимый шорох свидетельствует о том, что домены

представляют собой большие группы молекул. С недавнего времени мы стали объяснять происхождение этой последовательности щелчков несколько иначе. Раньше мы думали, что каждый щелчок связан с внезапным изменением направления намагниченности домена. Теперь мы знаем, что число таких щелчков гораздо больше количества доменов в образце. По-видимому, каждый щелчок связан с изменением границ домена, т. е. с обратимым ростом и сдвигом двух соседних доменов, как это происходит на первой стадии намагничивания.



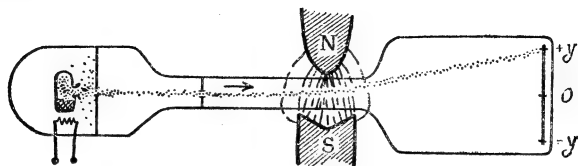
Фиг. 164. Некоторые атомы ведут себя как маленькие магниты.

Для исследования их магнитных свойств используются *неоднородные* магнитные поля.

1 — любой магнит, помещенный в *однородное* магнитное поле, поворачивается, но не испытывает продольного смещения; на него действует пара равных по величине, но противоположных по направлению сил; *2* — любой магнит, помещенный в неоднородное магнитное поле, поворачивается и движется в область более сильного поля.

В этом небольшом разделе физики мы показали, что теория является полезным наставником экспериментатора и мудрым другом научного исследователя. Если вы спросите: «Верна ли она?» — ученый сначала ответит: «Она полезна». Затем он добавит: «По крайней мере частично она верна». Некоторые из теоретических представлений, безусловно, верны, в чем вы сами можете убедиться, поставив опыты. Если же часть из них, как, например, представления о магнетизме атомов, покажутся вам несколько фантастичными, то, прежде чем спрашивать об их реальности, следовало бы ответить на вопрос: чем они полезны? Тем не менее

как наша научная любознательность, так и романтическая страсть к атомам побуждают нас узнать, что́ происходит внутри домена. И мы добиваемся успеха в этих исследованиях. Пропуская пучки отдельных атомов через *неоднородные* магнитные поля, мы обнаруживаем, что некоторые атомы на самом деле представляют собой магниты (фиг. 164—166).



Фиг. 165. Опыт по измерению магнитного момента атомов.

Электрически нейтральные атомы испускаются в вакуум, проходят через неоднородное магнитное поле и отклоняются в область наибольшей напряженности поля. Далее атомы попадают на чувствительную фотопленку, образуя на ней пятно.

Поразительный результат этого эксперимента заключается в том, что атомы создают три таких пятна в точках с координатами $+y$, 0 и $-y$. Это говорит о том, что атомы действительно представляют собой магниты, но их ориентация загадочным образом ограничена тремя направлениями, или, другими словами, «квантована».

Мы умеем, кроме того, заставлять атомы, помещенные в сильные магнитные поля, испускать свет, исследуя который можно еще больше узнать об их магнитных свойствах. Наконец, мы



Фиг. 166. Магнитные свойства атомов.

Не забывайте, что изображения атомов на этом рисунке весьма фантастичны и очень далеки от действительности. Электрон, движущийся по некоторой «орбите», создает магнитное поле наподобие электрического тока, обтекающего виток провода, и наделяет при этом свой атом магнитными свойствами. Кроме того, электрон имеет еще и собственное вращение, в результате которого создается добавочное магнитное поле. Однако лишь немногие атомы обладают магнитными свойствами, поскольку у большинства из них магнитные поля, создаваемые множеством электронов, компенсируют друг друга.

убеждаемся, что электроны, некоторые атомные ядра и даже не обладающий электрическим зарядом нейтрон ведут себя как крошечные магнитики. Каждый из них создает вполне определен-

ное магнитное поле, которое мы связываем с так называемым механическим «спином» — вращательным моментом, присущим частице. Эти магнитные свойства серьезно помогают нам разобраться в структуре атомного ядра.

Недавно проведенные опыты по отражению пучков нейтронов от магнитных материалов доказывают реальность существования *границ* доменов. Эти опыты дают нам возможность подсчитать действительное число доменов по измерению отражения нейтронного пучка. Таким образом, старая теория магнетизма и новейшая экспериментальная ядерная физика, возникновение которых разделено целым столетием, связываются друг с другом воедино.

Рассказывая эти подробности о поведении атомов, мы хотели просто сообщить новые результаты и не ставили перед собой цели экспериментально или каким-нибудь другим путем обосновать их реальность. Поэтому вам следует принять их на веру как интересные факты и как подтверждение того, что физики сумели довести до тонкостей свою широко применимую теорию магнетизма.

ГЛАВА 35 • ХИМИЯ И ЭЛЕКТРОЛИЗ

Под элементами я понимаю... некоторые первичные простые тела, которые нельзя разложить на части и невозможно получить из каких-либо других тел, а также друг из друга. Все сложные вещества составлены из этих элементов и в конечном счете распадаются на них.

Роберт Бойль, 1661 г.

Мы не можем быть уверены, что вещество, которое мы сейчас принимаем за элемент, является таковым на самом деле. Мы лишь в состоянии сказать, что такая субстанция является пределом возможностей современного химического анализа, и ее нельзя расщепить на более простые части, по крайней мере в настоящее время.

Антуан Лоран Лавуазье, 1789 г.

Эта глава предназначена для тех читателей, которые не знают химии. В ней излагаются основы химической науки, необходимые для изучения атомной физики, изложенной в пятой части настоящей книги.

Если у вас не было курса химии, то загляните в эту главу, чтобы получить общее представление о химических превращениях, атомном весе, атомном номере, ионах и т. п.

Если же вы уже знакомы с химией, то ваши знания, безусловно, шире и глубже того, о чем здесь говорится. Поэтому проявите снисходительность, читая эту главу.

ЧТО ТАКОЕ ХИМИЯ

Рассказать о химии в одной главе — все равно что одной короткой фразой описать содержимое бакалейной лавки: «На полках там стоит много банок со съестным и т. д.». Поэтому мы поставим себе задачу изложить только наиболее важные факты и основные представления химии и не будем раскрывать все богатейшее содержание этой науки или весь арсенал ее искусных средств. Мы обойдем молчанием и драматическое описание исто-

рии ее возникновения из средневековой алхимии и впечатляющее применение ее достижений в наш век логики и эксперимента. Мы перечислим только ее основные результаты — точнее, те взгляды, с которыми химики пришли к началу нашего столетия[1].

Химическое производство и методы. Синтез

Сначала ремесленники-красильщики, а впоследствии и ученые-химики научились приготовлять множество самых разнообразных веществ. В их работе широко применялись такие «физические методы», как растворение в воде, фильтрование и выпаривание растворов, дистилляция, электролиз и т. п. Но были и чисто «химические методы», как, например, нагревание двух смешанных друг с другом веществ с целью получить новое, отличное от них вещество, проведение химических реакций с помощью пламени и взрывов, получение газов при смешивании некоторых растворов и т. п. Провести границу между этими двумя понятиями очень трудно: нагревание минерала похоже на физический процесс, но оно же может привести и к химическим изменениям.

Начала химических знаний зародились на заре цивилизации. Первыми руководствами по химии были тщательно оберегаемые рецепты красильщиков и алхимиков. Современная химия напоминает сложнейшую кулинарную книгу — с анализом и рецептами, обоснованиями и правилами. «Чтобы приготовить омлет,— говорится в обычной поваренной книге,— нужно взять четыре яйца,

---

[1] Имеются достаточно веские причины представить здесь химию, так сказать, «в готовом виде», чтобы, не задерживаясь, продолжить изучение физики. Если бы нас непосредственно интересовала сама химия, то такой метод был бы, конечно, неприемлем. Вы получили бы неправильное представление как о самой науке, так и об отношении к ней ученых.

К сожалению, однако, весьма соблазнительно преподнести начальный курс любой науки в «готовом виде», просто перечисляя различные факты и выводы. Это дает возможность сообщить начинающему определенный запас сведений, без которого он не сможет ни понять, ни оценить теорию. Поэтому преподаватель часто впадает в искушение дать сначала лишь основную необходимую информацию, смысл которой разъясняется на следующей стадии процесса обучения. Однако студенты, которые не перешагнули первую ступень, получают очень обедненное представление о науке только как о коллекции разнообразных фактов, и от них ускользает стройная система знаний, в которой и заключается ее основное содержание. Вот почему мы и стремимся избежать этого. Все же при кратком изложении другой области науки, в настоящей книге — химии, а в книгах по химии — ядерной физики, нам приходится забыть о своем желании и сообщать множество сведений без объяснения того, как они были получены. Пусть это примечание послужит и предупреждением, и оправданием дальнейшему.

немножко масла, щепотку соли». Если отвлечься от неопределенности в количестве этих продуктов, то такой рецепт похож на научную инструкцию по приготовлению омлета, его синтезу. В химии многие вещества создаются в результате синтеза. Например, воду можно получить при взрыве смеси кислорода и водорода, двуокись углерода — при сжигании угля, а серную кислоту — в результате сгорания серы на воздухе с небольшими добавками избыточного кислорода (в присутствии платины, способствующей их соединению), а затем смешивания образующейся газообразной трехокиси серы с водяным паром.

Химический анализ

Поговорим теперь о процессе, обратном приготовлению омлета, о выделении его составных частей или *анализе*, который осуществить много труднее, даже если мы не начали поджаривать наш омлет. Но химик захотел бы пойти еще дальше. Разделив вещества, необходимые для приготовления омлета, он стал бы разлагать их на еще более простые вещества, такие, как вода, соль и др. Последние тоже представляют собой химические соединения, которые можно разложить на составные части. Например, яичный желток является не простым веществом, а смесью, из которой можно выделить несколько компонентов, а соль уже представляет собой отдельное химическое соединение. Она сохраняет свои *физические* свойства, какую бы малую ее часть мы ни взяли. Мельчайшая крупинка соли будет тем же кристаллом кубической формы, с той же плотностью и температурой плавления и будет так же преломлять световые лучи. При растворении в воде она даст одинаковое, пропорциональное разведению понижение точки замерзания. (Этот тонкий эффект используется в физической химии для оценки молекулярного веса.) И все же эти критерии довольно грубы, они не могут доказать, что поваренная соль не является однородной смесью, такой, как, например, стекло. Только *химический* анализ может сказать нам о том, что мы имеем дело с единым соединением, все молекулы которого одинаковы. Приведем два из бесчисленного множества примеров. Поваренную соль бросают в воду и получают соленый на вкус раствор (химический признак), который становится мутным при смешивании с солями серебра (анализ на хлориды). Каждый такой опыт с поваренной солью дает одинаковые результаты безотносительно к количеству взятой соли и независимо от того, получили ли мы ее путем рекристаллизации или очистили другим способом и сделали ли это

однажды или повторяли такой процесс много раз. Переходя ко все меньшим количествам соли и даже к сильно разбавленным растворам ее, мы встретимся с некоторыми практическими трудностями, но не заметим никакого изменения самой природы превращений. Отмечая постоянство химических свойств поваренной соли, мы можем перенести, экстраполировать их на ее отдельные молекулы. Только тогда, когда будут обнаружены свойства, *отличные* от свойств поваренной соли, мы сможем считать, что расщепили ее молекулы на атомы составляющих их элементов.

Теперь, когда мы узнали, что смеси можно разделить на простые однородные вещества, подобные поваренной соли, пора пойти дальше в построении химической науки по пути разложения химических соединений, если они действительно являются соединениями, на составляющие их первичные элементы. Это и есть те самые *элементы*, о которых 300 лет назад писал Роберт Бойль (см. эпиграф в начале главы).

Возвращаясь к нашему примеру чистого вещества, кусочку поваренной соли, зададим себе вопрос, подошли ли мы к пределу делимости или можно разложить соль на еще более простые вещества — элементы? Итак, сложное ли вещество — поваренная соль?

Электролиз — способ выделения элементов

Да, соль *можно* расщепить на элементы, применяя более интенсивные методы анализа, например *электролиз*, т. е. пропуская электрический ток через раствор или другую жидкость с целью получения искомых продуктов, которые выделяются на погруженных туда электродах. Расплавим соль и пропустим через нее электрический ток. Мы заметим, что при этом появляются два новых вещества, свойства которых резко отличаются от соли. На одном электроде образуются пузырьки хлора — зеленоватого, ядовитого, удушливого газа, на другом выделяется серебристо-серый металл — натрий. При этом поваренная соль разложится полностью. Дальнейшее разложение, скажем, частично на соль, а частично на песок — невозможно. Натрий и хлор — это *элементы*, из которых образована поваренная соль. Таким образом, элементы — это простейшие вещества, на которые расщепляются все соединения, но которые сами не поддаются дальнейшему расщеплению. Как только мы научились выделять элементы и узнали их свойства, мы получили основной строительный материал для синтеза всевозможных других веществ. Обыкновенная поварен-

ная соль разлагается на элементы натрий и хлор всегда в одной и той же пропорции: каждые 117 *кг* соли дают 46 *кг* натрия и 71 *кг* газообразного хлора. Тот факт, что из любых количеств соли натрий и хлор всегда выделяются в той же самой пропорции 46 : 71, однозначно характеризует это химическое соединение и дает убедительное подтверждение тому, что мы имеем дело всегда с одним и тем же простым веществом. Этот факт не только помогает нам лучше представить себе атомы, но дает даже большее: мы можем считать, что элементы натрий и хлор состоят из мириадов одинаковых атомов, только атомы хлора приблизительно в 1,5 раза тяжелее атомов натрия. Тогда поваренная соль состоит из отдельных групп атомов (молекул), по одному атому натрия и хлора в каждой, соединенных вместе какой-то таинственной силой. Если же массы этих двух видов атомов находятся в отношении 46 : 71, а мы в настоящее время знаем, что это действительно так, то легко понять, почему они входят в поваренную соль всегда в неизменной пропорции. Как само представление об атомах, так и соотношение масс 46 : 71 остаются непроверенными предположениями, пока они объясняют только свойства обыкновенной соли. Но когда мы узнаем, что постоянство содержания элементов выполняется опять и опять при переходе от одного вещества к другому, то атомная гипотеза получает серьезную поддержку и признание. Начав искать аналогичные соотношения между массами атомов в других химических превращениях, мы тут же их находим. Таким образом, мы приходим к пониманию сущности химии и узнаем, что она может предсказывать и объяснять результаты опытов, т. е. является наукой в подлинном смысле этого слова.

Смеси... Соединения... Элементы...

Понимание различия между смесями, соединениями и элементами является необходимой основой изучения химии, поэтому мы начнем этот раздел с нескольких примеров.

Насыпьте кучку из песка, соли, железной пыли и древесных опилок и хорошо их перемешайте. В какой бы пропорции они ни были взяты, вам всегда удастся снова разделить их, имея ковш воды и магнит. Эти вещества образовали *смесь*. Если песок состоит из камешков, то это будет *грубая смесь*, из которой их можно непосредственно достать руками. Если же песок и другие частицы очень малы, то такую смесь мы называем *тонкой*, но и ее удается рассор-

тировать вручную под микроскопом или с помощью других более искусных методов.

Можно приготовить еще более тонкие смеси различных веществ, например, растворяя поваренную соль в воде, сливая вместе воду и спирт или сплавляя цинк и медь для получения латуни. Это будут *молекулярные смеси*, которые уже нельзя рассортировать руками. Воздух тоже представляет собой смесь газов — азота, кислорода, углекислого газа, а также небольшого количества гелия и других благородных газов. Пропорции, в которых составлены эти смеси, могут быть самыми разнообразными, поскольку названные вещества смешиваются в широких пределах. Тем не менее разделить эти смеси всегда удается. Вы можете выпарить воду из раствора, благодаря чему соль выпадает в виде кристаллов, провести дистилляцию спирта, выделить медь путем электролиза, охладить газы до жидкого состояния и дать им поочередно выкипеть. Теперь рассмотрим составные части смесей: поваренную соль, спирт, воду, медь — и зададим вопрос, является ли каждая из них также смесью? Все они обнаруживают постоянные физические свойства — плотность, температуру плавления, кристаллическую форму и т. п. Ни одно из этих веществ не проявляет никаких признаков смесей, которые могли бы быть составлены в разнообразных пропорциях и рассортированы в виде различных молекул каким-либо фантастическим демоном. Напротив, каждое из них обладает свойствами, присущими *соединению* (или элементу): части, из которых оно состоит, входят в него в постоянных пропорциях. Соединения — это единые по своей природе вещества, однородные по составу от больших количеств до последней молекулы. Их определение фактически совпадает с определением молекулы — мельчайшей отдельной частицы вещества, которая обладает всеми его характерными свойствами. Молекула представляет собой всегда одинаковую для одного и того же химического соединения группу атомов, удерживаемых вместе электрическими силами.

Попытаемся разложить поваренную соль на еще более простые вещества. Такие не очень действенные методы, как нагревание или охлаждение, не дают никаких окончательных изменений. Только электролиз расплавленной соли превращает ее в газообразный хлор и натрий. Электролиз воды также вызывает ее превращение в два других газа — кислород, в котором ярким пламенем сгорают горючие вещества, и водород, легчайший из газов, образующий с кислородом взрывчатую смесь. Можно ли расщепить эти новые вещества на еще более простые? Все попытки осуществить это пу-

тем нагрева до очень высоких температур, повторного электролиза, даже путем воздействия другими очень агрессивными химическими веществами терпят неудачу[1]. Поэтому мы называем эти химические вещества *элементами*. Железо и медь — это тоже элементы, как и углерод, ртуть, алюминий, йод, но не латунь или воздух, которые представляют собой смеси, и не вода или поваренная соль, относящиеся к соединениям. При синтезе, разложении и превращении веществ мы никогда не меняем самих элементов. Они остаются неизменными первичными кирпичиками во всех химических процессах [2].

«Образование одного вещества из других посредством химических превращений возможно только в том случае, если в этих других веществах присутствуют все необходимые элементы. Хотя такое утверждение нигде не выражалось в виде закона, оно тем не менее является фундаментальной аксиомой, отличающей химию от алхимии»[3].

Вернемся к анализу обычной поваренной соли и зададим вопрос: откуда известно, что натрий и хлор представляют собой элементы, т. е. первичные составные части, а не какие-то промежуточные вещества? Хотя теперь мы знаем это безошибочно, нужно напомнить, что признание многих веществ элементами пришло не сразу и первое время следовало лишь из безуспешных попыток расщепить их на еще более простые части. Некоторые вещества, такие, как золото, серебро, свинец, считались элементами уже очень давно, еще с тех пор, когда они были получены в тиглях средневековых алхимиков. Значительно позже, когда удалось выделить из воздуха несколько различных газов, было установлено,

---

[1] Химическое воздействие на хлор и кислород может привести к образованию новых веществ, но только путем присоединения. Например, при взаимодействии хлора или кислорода с натрием получается осадок белого цвета, масса которого равна сумме масс участвующих в реакции металла и газа. Иными словами, взаимодействие снова порождает более сложное вещество, а не приводит к расщеплению на составные части. Таким образом, тщательное взвешивание предохраняет химию от ошибочных заключений.

[2] В начале нынешнего столетия мы научились изменять ядра атомов элементов, бомбардируя их атомными частицами высокой энергии, полученными на ускорителях (см. гл. 42 и 43). Таким образом, мы можем превратить одни атомы в другие, переходя от простоты химических представлений к совершенно иным горизонтам. Однако при обычном рассказе об атомах мы предпочитаем придерживаться точки зрения, принятой в химии, поскольку атомы невозможно изменить обычным химическим или физическим воздействием.

[3] K. B. Krauskopf, Fundamentals of Physical Science, 1st ed., N. Y. Mc-Graw Hill, 1941.

что азот и кислород также не поддаются дальнейшему разложению: при действии на них другими химическими веществами всегда получалось *увеличение* веса конечного продукта, а не расщепление его на более простые части с меньшими весами. Газ, который мы теперь называем углекислым, оказывается возможным разложить на газообразный кислород и черную сажу (или даже чистой воды алмаз), и он легко синтезируется из них (при сгорании углерода). Долгое время вода тоже считалась элементом, пока Кавендиш не расщепил ее на газообразные кислород и водород. Вода сначала была названа HO, так как считалось, что в каждой молекуле воды соединились по одному атому кислорода и водорода. Прошло длительное время, пока химические опыты и другие аргументы не заставили ученых поверить, что настоящая формула воды H_2O.

В течение длительного периода развития химии неудачи попыток расщепить вещество на составные части были для химиков единственной надежной гарантией того, что они имеют дело с элементом. Затем сто лет назад Менделеевым, а также другими учеными была предложена стройная упорядоченная система элементов. Об этой системе, называемой в настоящее время периодической, мы вкратце расскажем в этой главе несколько позже. Она представляет собой нечто вроде генеалогического древа элементов, расположенных в соответствии с их атомными весами и химическими свойствами. Периодическая система служит великолепным поясняющим руководством, поэтому в каждой книге по химии она упоминается, пожалуй, гораздо чаще, чем родословная героев в иных детективных рассказах. Все вещества, про которые мы сейчас знаем, что они являются элементами, располагаются в ней в удивительно простом порядке, указывая на правильность первоначальных догадок об их природе[1]. В настоящее время окончательное решение, является ли данное вещество элементом, принимается на основании измерений частот его спектральных линий, лежащих как в рентгеновской, так и в видимой световой областях.

---

[1] В течение длительного времени все еще имелись основания для беспокойства по поводу правильности периодической системы. Даже в нашем столетии был «открыт» один элемент, заполняющий пустующую клетку, который, как оказалось позже, не обладал нужными химическими свойствами. Тогда Нильс Бор, основываясь на своей модели атома (см. гл. 44), предсказал ожидаемые свойства элемента, который должен был бы стать на свободное место. Последовавшие затем тщательные поиски позволили выделить из подходящих минералов этот элемент, названный гафнием.

Химические превращения, или реакции

В качестве примера химических реакций, которые современный химик объясняет как обмен электронами между атомами, мы рассмотрим превращения, происходящие с углекислым газом. Углекислый газ, CO_2,— это тяжелый бесцветный газ, который получается при сжигании угля в атмосфере кислорода или образуется (вместе с водой) при окислении или расщеплении питательных веществ (таких, как, например, сахар) в живом организме. В процессе горения атомы углерода присоединяют по две молекулы кислорода, образуя тяжелые молекулы CO_2. В обычных условиях этот газ не отдает свой кислород для поддержания горения других веществ — атомы кислорода связаны в нем очень прочно, поэтому им можно погасить не только легкое пламя, но даже и большой пожар. Этот газ слегка ядовит, он вреден для живого организма тем, что препятствует нормальному газообмену в легких. Углекислый газ растворяется в воде, придавая ей слабый кислый привкус (и образуя хорошо знакомый напиток — газированную воду). При этом получается непрочное химическое соединение, известное под названием угольной кислоты (CO_2+ $+H_2O=H_2CO_3$), или гидрокарбоната, так как радикал CO_3 (который в свободном состоянии не существует) называется карбонатом. Если добавить в раствор поваренную соль (хлористый натрий), то там образуется весьма сложная смесь. Опыты по электролизу водных растворов показывают, что при растворении подобных веществ они расщепляются на электрически заряженные атомы или группы атомов (радикалы), называемые ионами. Можно представить, что в полученной нами смеси будет присутствовать некоторое количество положительных ионов натрия, отрицательных ионов хлора, положительных ионов водорода и отрицательных ионов CO_3. Теперь уже нельзя сказать, что там есть хлористый натрий и угольная кислота или соляная кислота и карбонат натрия, или даже смесь **всех четырех веществ, так как при растворении в воде любая пара разнородных молекул образует те же самые четыре иона. Вероятнее всего, каждая из комбинаций то объединяется, то расщепляется снова**, так что все молекулы находятся в неустойчивом состоянии.

Наши рассуждения будут бездоказательны до тех пор, пока мы не удалим из раствора какое-либо вещество, чтобы расстроить установившееся там равновесие. Однако сейчас это не так-то легко сделать, поскольку все они растворены в воде. Предположим теперь, что мы смешали растворы другого карбоната и другого

хлорида, например карбоната натрия (соды) и хлористого кальция (вещества белого цвета, которым посыпают зимой тротуары, чтобы с них стаял лёд). И в этом случае раствор будет содержать смесь ионов — ионы натрия, ионы кальция, ионы хлора и ионы карбоната. Спросим опять, что́ же мы имеем на этот раз: карбонат натрия и хлористый кальций или хлористый натрий и карбонат кальция, или же какое-то промежуточное вещество? В рассматриваемом примере одна из получающихся комбинаций не растворима в воде. Случайные столкновения между ионами приводят к образованию молекул карбоната кальция, которые уже не растворяются в воде, а собираются в мельчайшие белые крупинки мела и выпадают из раствора в виде твердого осадка. Такой необратимый процесс происходит до тех пор, пока осаждение углекислого кальция не прекратится из-за того, что его уже просто не останется в растворе. Отфильтрованный и просушенный осадок представляет собой чистый мел, и его можно использовать по назначению. Здесь мы имеем наглядный пример химического производства.

Однако было бы неразумно и неудобно получать мел таким способом (если только мы не нуждаемся в особо чистом продукте), поскольку его можно непосредственно добывать в горных карьерах. Откроем секрет, что те вещества, которые использовались в нашем химическом «производстве», вероятно, и были приготовлены из этого натурального мела.

Взяв в качестве исходного сырья мел, мы можем разложить его прокаливанием на углекислый газ и известь. Известь, или окись кальция,— это белый порошок, получающийся при «ржавлении» на воздухе металлического кальция. 100 *кг* мела дают 56 *кг* извести и 44 *кг* углекислого газа. Практически этот процесс используется, конечно, не для получения углекислого газа, а в первую очередь для производства извести, которая необходима для сельского хозяйства и химической промышленности. Известь немного растворяется в воде, образуя слабый горьковатый раствор, содержащий ионы кальция и, вместо ожидаемых ионов кислорода, ионы гидроксила OH^-, которые получаются в результате ее взаимодействия с водой при растворении.

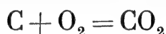
Взяв продукты разложения мела, полученные путем прокаливания (при котором его молекулы как бы разбиваются сильными ударами микроскопических молоточков), мы можем снова соединить их вместе. Известь+углекислый газ опять образуют мел. Однако эту реакцию трудно провести с кусками твердой извести, так как доступ к ней углекислого газа затруднен. Гораздо лучше

растворить известь в воде и пропускать углекислый газ через раствор. При этом будут хорошо видны белые облачка образующегося мела[1].

Химические формулы и уравнения

Факты, с которыми мы здесь сталкиваемся, становятся все более сложными и трудными для понимания и запоминания. Химики стараются упростить их, используя лаконичные уравнения, которые показывают, как атомы элементов соединяются или замещают друг друга. Эти уравнения выражают их уверенность в неуничтожимости материи и неизменности составляющих эту материю атомов, которая позволяет им записывать по одинаковому числу атомов одного и того же элемента в обеих частях уравнения. Атомы не исчезают, их «баланс» всегда сходится. Каждый атом мы изображаем одной буквой (или, где это необходимо во избежание неопределенности, двумя буквами). Атом углерода обозначается буквой C, кислорода — буквой O, кальция — буквами Ca, хлора — буквами Cl. Для водорода, азота, серы приняты обозначения H, N, S. Атом натрия записывается Na, что происходит от старого латинского названия поваренной соли natrium, а атом меди Cu (от cuprum). Соединение одного атома кальция и одного атома кислорода — окись кальция (известь) обозначается CaO. Если же молекула какого-либо соединения содержит два одинаковых атома, то после их символа пишется индекс 2, например CO_2 или H_2SO_4[2].

Химическое превращение, происходящее при сжигании угля, о котором мы уже говорили, изображается так:



$$C + O_2 = CO_2$$

[углерод + кислород дают углекислый газ].

---

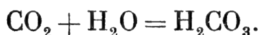
[1] Эта реакция служит простым методом опознавания углекислого газа. Проведите ее сами. Взболтав известь в воде и подождав, пока ее избыток осядет, слейте чистый раствор, и вы получите известковую воду. Подуйте в эту воду через соломинку, и вы увидите, как вырастает белое облачко мела. Воздух, лишенный углекислого газа, не вызывает такого действия. Продолжайте некоторое время продувать воздух, содержащий углекислый газ, и наблюдайте за дальнейшими изменениями. Химия, оказывается, не столь проста, как может показаться с первого взгляда...

[2] Индексы, стоящие в химических формулах, конечно, обозначают, что атомы добавляются, а не умножаются, как в алгебре. Так, наименование фирмы «Хаггинс, Хаггинс, Смит, Осборн, Осборн, Осборн и Осборн», химик записал бы как H_2SO_4.

[Один атом углерода соединяется с содержащей два атома молекулой кислорода, образуя одну молекулу углекислого газа.]

Сейчас вы уже накопили достаточно знаний, чтобы догадаться, что атомы кислорода, водорода, хлора и многих других газов объединяются в молекулы по два, т. е. образуют молекулы O_2, N_2 и т. д. Действительно, имеются весьма веские основания записывать их именно таким образом (разумность этого, в частности, заключается в следующем: одноатомный водород H в отличие от двухатомного H_2 отвечает свободному, только что рожденному агрессивному атому водорода, с жадностью вступающему в химические реакции).

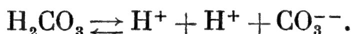
Другое, знакомое нам превращение:



$$CO_2 + H_2O = H_2CO_3.$$

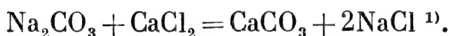
[Одна молекула углекислого газа при растворении соединяется с одной молекулой воды, образуя молекулу угольной кислоты.]

Мы помним также, что H_2CO_3 может расщепляться на ионы водорода H^+, H^+ и ион CO_3, т. е. CO_3^{--}:



$$H_2CO_3 \rightleftarrows H^+ + H^+ + CO_3^{--}.$$

При сливании растворов хлористого натрия и угольной кислоты смесь остается совершенно прозрачной, а при смешивании растворов углекислого натрия Na_2CO_3 и хлористого кальция $CaCl_2$ мы видим облачко осаждающегося мела:



$$Na_2CO_3 + CaCl_2 = CaCO_3 + 2NaCl$$ [1].

Зная, что растворенные вещества могут расщепляться на ионы, осторожный химик написал бы такое уравнение для электрически заряженных ионов и заменил бы знак равенства «=» стрелками $\rightleftarrows$, которые означают, что процесс может протекать в обоих направлениях. Но если бы он заметил, что одна из четырех комбинаций $CaCO_3$ нерастворима, то поставил бы только одну стрелку:

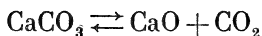


$$Na_2CO_3 + CaCl_2 \rightarrow CaCO_3 + 2NaCl.$$

---

[1] Как правило, мы не пишем в химических уравнениях воду, в которой растворены реагирующие между собой вещества. Считается, как само собой разумеющееся, что в обеих частях уравнения присутствует одинаковое число молекул воды. Хотя вода не оказывает действия на конечные продукты реакции, она в сильной мере способствует ей, вызывая образование ионов, т. е. играет тем самым очень существенную роль.

Возьмем теперь наш только что полученный мел $CaCO_3$ и прокалим его:



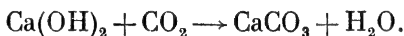
$$CaCO_3 \rightleftarrows CaO + CO_2$$

[мел превращается в известь и углекислый газ].
Здесь стрелки направлены в обе стороны, так как реакция может идти в любом направлении в зависимости от температуры. Растворяясь в воде, известь образует раствор гидроокиси кальция:



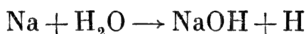
$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2.$$

Полученная известковая вода реагирует с продуваемым через нее углекислым газом следующим образом:



$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O.$$

Гидроксильная группа OH входит в состав самых едких щелочей, хотя сама известковая вода обладает весьма слабыми щелочными свойствами. Опустим в воду небольшой кусочек металлического натрия, и он вырвет атом водорода из молекул этой нейтральной жидкости, образуя сильную щелочь:



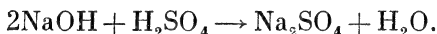
$$Na + H_2O \longrightarrow NaOH + H$$

[натрий и вода дают гидроокись натрия и водород].
Выделяющиеся пузырьки газообразного водорода говорят нам о том, что нужно удвоить это уравнение и записать его в виде



$$2Na + 2H_2O \longrightarrow 2NaOH + H_2.$$

Гидроокись натрия (каустическая сода, или едкий натр) — это мыльный на ощупь, едкий щелочной раствор, нейтрализующий кислоты



$$2NaOH + H_2SO_4 \longrightarrow Na_2SO_4 + H_2O.$$

[Гидроокись натрия (каустическая сода)+серная кислота (сернокислый водород) дают сернокислый натрий и воду.]

Кислоты

Все кислоты содержат водород и неметаллические элементы (хлор в соляной кислоте, сера и кислород в серной). Для кислот характерно, что входящие в них атомы водорода в водном растворе становятся ионами H^+, придавая ему кислый вкус. (В растворах щелочей в противоположность этому образуются ионы OH^-.) Распознавать кислоты по их кислому вкусу все же опасно, лучше

познакомиться с их другими свойствами. Кислоты способны нейтрализовать щелочи, образуя воду и выделяя тепло. Они реагируют со многими металлами, которые замещают в них водород. Большинство кислот вытесняет углекислый газ из растворов карбонатов.

Мы можем непосредственно получить соляную кислоту, смешивая равные объемы водорода и тяжелого зеленоватого газа хлора или беря их в весовой пропорции 2 : 71 и вызывая взрывную реакцию с помощью вспышки ультрафиолетового света:



$$H_2 + Cl_2 \longrightarrow 2HCl$$

[водород+хлор образуют при взрыве пары хлористого водорода, или гидрохлорида].

Хлористый водород — легко растворяющийся в воде газ, образующий концентрированные растворы с очень кислым вкусом. Обычная соляная кислота и есть раствор хлористого водорода. Она широко применяется в химической промышленности и участвует в пищеварении человека.

Простейший способ получения углекислого газа в лабораторных условиях — подействовать соляной кислотой на мел:



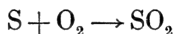
$$CaCO_3 + 2HCl \longrightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2.$$

Если продувать CO_2 через раствор едкого натра, то последний реагирует с ним с образованием карбоната. (Если хотите, можно сказать, что CO_2 дает угольную кислоту H_2CO_3, которая затем нейтрализует щелочь NaOH.)



$$2NaOH + CO_2 \longrightarrow Na_2CO_3 + H_2O.$$

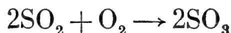
Серную кислоту можно получить из минеральной необработанной серы:



$$S + O_2 \longrightarrow SO_2$$

[сера при сгорании образует двуокись серы]

и затем

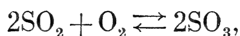


$$2SO_2 + O_2 \longrightarrow 2SO_3$$

[двуокись серы присоединяет добавочный атом кислорода].

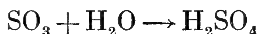
Чтобы осуществить последнюю реакцию, необходимо привести газы в контакт с платиной, которая действует подобно посреднику, ускоряя реакцию, но выходя из нее неизменной. Такие вещества мы называем *катализаторами*. Эта реакция медленно протекает слева направо, если платина не нагрета, а при очень высоких тем-

пературах идет в обратном направлении. Поэтому ее следует записать так:



$$2SO_2 + O_2 \rightleftarrows 2SO_3,$$

и если нам необходимо наладить производство серной кислоты, то нужно выбрать такую температуру, чтобы реакция быстро протекала слева направо. Затем, растворяя SO_3 в воде, получаем



$$SO_3 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4$$

[трехокись серы, соединяясь с водой, образует серную кислоту].

Щелочи

Щелочи — это вещества, которые при растворении в воде образуют ионы гидроксила $(OH)^-$. Обычно они представляют собой окиси или гидроокиси металлов. Большинство металлов на воздухе покрывается пленкой, которую мы и называем окисью. Железо ржавеет, медь становится тусклой, на кальции образуется белая корка извести, а натрий присоединяет кислород и влагу столь энергично, что его приходится хранить погруженным в масло. Некоторые из этих окислов не реагируют с водой, другие же растворяются или вступают с ней в реакцию, образуя гидроокиси. Ионы гидроксила $(OH)^-$ сообщают этим растворам характерный горький вкус и способность нейтрализовать кислоты, а также оказывают разъедающее действие на кожу. Примерами щелочей являются гидроокись натрия $NaOH$, гидроокись кальция $Ca(OH)_2$, гидроокись аммония NH_4OH, где группа аммония NH_4 ведет себя подобно металлу.

При смешивании растворов кислоты и щелочи ионы H^+ и $(OH)^-$ соединяются, образуя воду и выделяя значительное количество тепла. Если эти растворы взять в нужной пропорции, то продукты реакции будут нейтральными веществами, не обладающими свойствами ни кислоты, ни щелочи[1]. (Конечно, если одно из веществ было в избытке, то раствор будет показывать характерные для этого вещества свойства.)

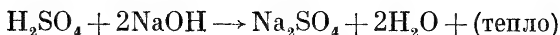


$$HCl + NaOH \longrightarrow NaCl + H_2O + (\text{тепло})$$

[хлористый водород (соляная кислота)+гидроокись натрия (каустическая сода) образуют хлористый натрий (поваренную соль)+воду],

[1] «Нейтральный» в химии означает: не обладающий свойствами ни кислоты, ни щелочи.

или



$$H_2SO_4 + 2NaOH \rightarrow Na_2SO_4 + 2H_2O + (\text{тепло})$$

[серная кислота (гидросульфат)+гидроокись натрия дают сульфат натрия+воду].

Оба эти примера иллюстрируют общее правило:

щелочь+кислота дают соль+воду+(тепло).

Здесь под словом «соль» понимаются многочисленные нейтральные соединения, одним из которых является обычная столовая соль. (Другие примеры солей: техническая сода, сульфат меди, хлористый кальций.) Соли — нейтральные соединения, однако по своей структуре они похожи на кислоты, в которых водород замещен одним или несколькими атомами металла.

Если подействовать гидроокисью натрия на «жирные кислоты», с которыми мы встречались в опытах по изучению поверхностного натяжения, то образующаяся в результате этой реакции соль оказывается обыкновенным мылом. Однако промышленный способ изготовления мыла является несколько более сложным.

ХИМИЯ И АТОМЫ

Доказательства существования атомов

В приведенных нами примерах химических превращений мы говорили об атомах, не приводя никаких доказательств в пользу их существования. В каждом уравнении буквы, отвечающие определенному элементу, например H или Cl, означали «один атом» (водорода или хлора). Конечно, эти обозначения можно было бы считать просто удобным способом описания, понимая под ними «некоторое количество» водорода или «немного» хлора. Однако, когда мы пишем химическое уравнение, в обеих частях которого каждый символ появляется в равных количествах, мы подразумеваем тем самым, что атомы существуют, а число их сохраняется. Мы считаем, что каждый элемент имеет свои атомы, которые участвуют в обмене между молекулами, но не могут создаваться или исчезать. Эта уверенность основана на тщательных измерениях веса веществ, принимающих участие в химических реакциях. В настоящее время самым простым способом разложения веществ на элементы является электролиз. Пропустим через воду электрический ток, и на электродах появятся пузырьки водорода и кислорода в ве-

совом отношении 1 : 8, а уровень воды начнет понижаться, причем понижаться очень медленно, поскольку вода гораздо плотнее, чем эти газы. (На получение каждого кубического метра смеси газов расходуется $^1/_2$ *кг* воды, и эта смесь весит в точности $^1/_2$ *кг*. Вода, кислород и водород всегда сохраняют весовое соотношение 9 : 1 : 8.) Но воду можно разложить на водород и кислород и другими способами, например пропуская пар над докрасна раскаленным железом, которое забирает из воды весь кислород, освобождая водород. И опять на каждые 9 *кг* воды получается 1 *кг* водорода. С другой стороны, газообразный фтор отнимает у воды содержащийся в ней водород, в результате чего образуется кислород. При этом во всех случаях выдерживаются следующие весовые пропорции:

9 частей воды дают 1 часть водорода+8 частей кислорода.

Те же самые весовые пропорции соблюдаются и при синтезе воды. Если мы взорвем смесь 1 *кг* водорода и 8 *кг* кислорода, то получим в точности 9 *кг* воды. (При смешивании в другой пропорции избыток газа не участвует в реакции, например 3 *кг* водорода+8 *кг* кислорода→9 *кг* воды+2 *кг* водорода.)

Как мы уже говорили раньше, при электролизе расплавленного хлористого натрия получаются газообразный хлор и сода в весовой пропорции 71 : 46. Сжигание углерода[1] в атмосфере кислорода дает CO_2, в котором эти элементы находятся в пропорции 3 : 8. Если же доступ воздуха к горящему углероду ограничен, то образуется другое соединение — легкий ядовитый бесцветный газ, смесь которого с воздухом взрывоопасна. Этот газ называется окисью углерода (или угарным газом) и содержит углерод и кислород уже в пропорции 3 : 4. Неизменные пропорции содержания элементов в соединениях легко объяснить на основе представления о существовании однородных атомов каждого составляющего элемента. Это представление становится еще более убедительным, когда мы рассмотрим количественные соотношения между элементами в нескольких различных соединениях. Взгляните на следующую таблицу:

---

[1] Этот процесс трудно осуществить в небольших масштабах, так как углерод нужно хорошо нагреть, чтобы началось горение, а затем снабжать в надлежащих количествах воздухом, или кислородом, но без тяги, которая создала бы сильное охлаждение. В больших масштабах это совсем просто; примером может служить угольный пожар.

Название химического соединения	Весовые соотношения				
	H	O	Cl	Na	C
Вода	1	8			
Хлористый водород	1		35,5		
Хлористый натрий			35,5	23	
Углекислый натрий		48		46	12
Двуокись углерода		32			12
Гидроокись натрия	1	16		23	

Изучение соотношений между элементами среди большого количества других химических соединений дает аналогичные результаты, которые убедительно подкрепляют атомную гипотезу. Если считать, что весь водород состоит из одинаковых легких атомов, то атомы кислорода будут тяжелее их в 8 или, возможно, в 16 раз, атомы хлора — в 35,5 раза, натрия — в 23 раза и т. д. Мы можем представить молекулу любого химического соединения состоящей из таких атомов. Ясно, что в молекулах различных соединений может присутствовать по нескольку атомов одного элемента. (Например, если гидроокись натрия — это $NaOH$, то вода будет H_2O, а если вода была бы HO, а не H_2O, то гидроокись натрия нужно было бы записать NaO_2H.)

Использование *количественной, основанной на опыте* атомной теории необычайно облегчило понимание химических процессов и явилось огромным достижением науки. Эта теория в удивительно четкой форме была сформулирована Джоном Дальтоном приблизительно в 1808 г. Новые тщательные измерения и открытия ряда неизвестных элементов, сделанные Берцелиусом, Дэви и многими другими учеными, еще более способствовали ее быстрому прогрессу. Во всех химических процессах атомы вели себя так, что их относительная масса оставалась неизменной. Постоянное подтверждение этого правила в любых измерениях заставляет нас признать, что атомы реально существуют, и, придя к представлению о неизменных массах атомов, мы создали такую стройную концепцию, что нам трудно было бы отказаться от нее, даже если бы вдруг оказалось, что атомы — это только иллюзия!

Если все же наши представления правильны, если простейшие однородные атомы, которые могут объединяться друг с другом в молекулы, существуют, то можно сделать еще один важный вывод: когда одни и те же элементы образуют несколько различных

соединений, то количества элементов в этих соединениях должны быть связаны между собой весьма простыми соотношениями. Этот так называемый Закон Кратных Отношений является одним из немногих законов, которые были сначала обнаружены теоретически и лишь затем подтверждены на опыте. Рассмотрим следующую таблицу:

Название химического соединения	Весовые соотношения				
	H	O	Cl	Cu	C
Вода	1	8			
Перекись водорода	1	16			
Хлористая медь (закисная)			35,5	63,5	
Хлористая медь (окисная)			71	63,5	
Двуокись углерода (углекислый газ)		32			12
Окись углерода (угарный газ)		16			12

(В этой таблице использованы числовые значения, которые демонстрируют простоту соотношений особенно наглядно. В действительности измерения не дают непосредственно столь простых соотношений.)

Если формулы воды H_2O, хлористой меди (закисной) $CuCl$, двуокиси углерода CO_2 так просты, то изображаются ли другие вещества столь же простыми формулами?

Даже приведенные примеры не могут *окончательно* доказать, что атомы действительно существуют. По крайней мере один из выдающихся химиков прошлого столетия утверждал свое право не верить в них, пока, практически только в начале нашего века, эксперименты с атомными частицами (броуновское движение, опыты Милликена по измерению заряда e электрона и отношения заряда к массе e/m электронов и ионов, а также опыты по рассеянию альфа-частиц) не заставили признать атомы безусловно необходимыми для описания материи.

Мы далеки от утверждения, что простым взвешиванием можно измерить относительные массы *отдельных* атомов. Но как же узнать, в 8 или 16 раз масса атома кислорода больше, чем водорода? Широко известное соединение углерода и водорода — газ метан — содержит их в весовом соотношении 3 : 1. Можно ли записать метан в виде CH, сказав, что углерод только в 3 раза тяжелее во-

дорода? Химики считают, что на самом деле формула метана CH_4, т. е. соотношение между углеродом и водородом следует записать $(4\times3):(4\times1)=12:4$, иначе говоря, углерод в 12 раз тяжелее водорода. Как удалось сделать такое важное заключение? Эта задача была решена с помощью хитроумного химического приема. Метан был обработан хлором, который заместил в нем водород. Если бы метан содержал по одному атому C и H, то он превратился бы в CCl. Если же метан — это CH_4, то в нем можно заменить на хлор 1, 2, 3 или даже 4 водородных атома. И в самом деле, действием хлора на метан были получены четыре различных химических соединения. Первое — тяжелый газ CH_3Cl, второе — еще более тяжелый газ CH_2Cl_2, затем жидкость $CHCl_3$ (хлороформ) и, наконец, ядовитая жидкость — четыреххлористый углерод CCl_4.

Вот как распределяются весовые пропорции между элементами в этих веществах:

	Весовые соотношения между элементами			Приведенные весовые соотношения		
	H	C	Cl	H	C	Cl
Метан	1	3		4	12	
Хлористый метил	1	4	11,8	3	12	35,5
Дихлорметан	1	6	35,5	2	12	71
Хлороформ	1	12	106,5	1	12	106,5
Четыреххлористый углерод		3	35,5		12	142

Как только вы разберетесь в этих соотношениях и приведете их к виду, который изображен в правой части таблицы, вам станет ясно, что масса атома углерода должна быть в 12 раз больше массы атома водорода. (Если, конечно, в действительности формула метана CH_8, то атом углерода будет тяжелее не в 12, а в 24 раза. Однако в этом случае можно было бы ожидать появления еще и других хлорзамещенных метана, таких, скажем, как CH_7Cl, которые в действительности не обнаруживаются. Имеются и другие убедительные доказательства, подтверждающие правильность выбора значения 12.)

Вернемся теперь опять к воде. Если ее формула HO, то отношение масс атомов водорода и кислорода 1 : 8. Почему же мы должны считать, что вода — это H_2O, т. е. что атом кислорода в 16 раз тяжелее атома водорода. Когда впервые было обнаружено, что

вода содержит кислород и водород, ей как раз и приписали состав HO. Эта ошибка была исправлена только с появлением закона Авогадро, что в значительной степени помогло атомной химии прийти к ее современному состоянию.

Объемы газов и химические превращения

Современные методы взвешивания и точные расчеты показывают, что массы элементов относятся приблизительно как целые числа. Однако в прежние времена более легким и очевидным количественным методом было измерение объема газов. Если мы соединим водород и кислород при температуре, скажем, 100° С и будем поддерживать образующуюся при этом воду в виде пара, то обнаружим, что

2 *л* водорода соединяются с 1 *л* кислорода, образуя 2 *л* пара,
или 1 *л* хлора и 1 *л* водорода дают 2 *л* газообразной соляной кислоты,
или при горении 2 *л* окиси углерода расходуется 1 *л* кислорода и получаются 2 *л* двуокиси углерода.

Можно привести десятки подобных примеров простых соотношений между объемами реагирующих газов. (Конечно, все измерения должны производиться при постоянной температуре и одном и том же давлении, скажем при давлении, равном атмосферному.)

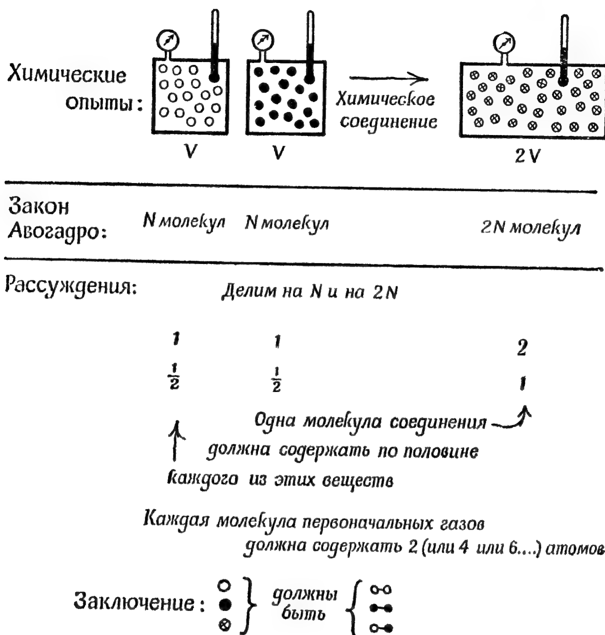
Закон Авогадро

Вскоре после того, как Гей-Люссак указал на то, что объемы вступающих в реакцию газов подчиняются простым соотношениям, итальянский ученый Амадео Авогадро высказал блестящую догадку (~1813 г.), что (при любых выбранных температуре и давлении) *равные объемы различных газов содержат одинаковое число молекул, т. е. независимо от сорта газа* в одном и том же сосуде содержится равное число молекул. Авогадро так убедительно аргументировал свои мысли, что если бы вы прочитали его записи, то сочли бы заключения, сделанные им, неопровержимыми. Данные современной физики (см. гл. 30) полностью подтверждают правоту ученого, и мы называем этот закон *законом Авогадро*.

Применим закон Авогадро к химической реакции, в которой 1 *л* хлора (N молекул) соединяется с 1 *л* водорода. Этот пример иллюстрируется фиг. 167.

Опираясь на закон Авогадро, а также на экспериментальные факты, мы приходим к заключению, что *одна* молекула хлористого

водорода содержит *половину* молекулы водорода и *половину* молекулы хлора; иными словами, *обе эти молекулы должны обладать способностью делиться пополам*. Это значит, что молекула водорода может быть H_2, H_4 или H_6, но не H. Останавливаясь на самом простом предположении, будем считать, что она представляет



Фиг. 167. Доказательство двухатомного состава молекул водорода, хлора и хлористого водорода.

собой H_2. Это предположение мы могли бы подкрепить соображениями такого рода, которые мы рассматривали, говоря о метане, хотя до сих пор ни один чисто химический эксперимент не исключил полностью возможность того, что правильным ответом было бы H_4 или H_6. По тем же самым причинам мы считаем, что молекула газообразного хлора должна быть Cl_2. *Что же мы можем сказать, основываясь на аналогичных аргументах, о реакции, в которой получается двуокись углерода? Что говорит нам реакция образования воды?* Вы можете удостовериться сами, что воду необходимо записывать H_2O.

В любых химических реакциях, в которых исходными или конечными продуктами являются газы, мы снова и снова встречаемся с простыми соотношениями между их объемами — 1 : 1, 2 : 1, 3 : 2 и т. д. (при условии, что объемы измеряются при постоянных температуре и давлении). Связывая эти экспериментальные факты с законом Авогадро, мы все более убеждаемся в том, что сталкиваемся здесь с образованием или перестройкой молекул: одна молекула дает другую молекулу, из двух молекул получается одна или из трех две и т. д.

Атомные веса

Таким образом, в результате точных измерений масс веществ, участвующих в химических реакциях, а также объемов реагирующих и образующихся газов в науку вошла замечательная атомная гипотеза, т. е. представление о том, что *каждый элемент имеет однородные атомы с характерной для них массой и что молекулы — это стандартные, родственные группы атомов.* Простота количественных соотношений, которые дала атомная теория, оказала неоценимую помощь развитию химии. Но для широкого количественного использования теории химикам не хватало данных о массах атомов различных элементов, точнее, об их относительных массах, выраженных в некоторой удобной шкале. Эти массы удалось измерить путем тщательного взвешивания веществ, образующих химические соединения.

Относительные массы атомов в шкале, где за единицу принимается масса атома водорода, называются *атомными весами.* Результаты взвешиваний показали, что для О и Н, входящих в состав воды, соблюдается соотношение 8 : 1; измерение объемов этих газов показало, что состав молекулы воды — H_2O; таким образом, атомный вес кислорода должен быть равен 16. Соотношение 23 : 16 : 1 для Na, O и H, входящих в состав гидроокиси натрия, показывает, что ее формула должна быть NaOH, а атомный вес натрия — 23.

К 1810 г. Дальтон исследовал около 20 элементов и приблизительно установил их атомные веса. С этого времени высокое экспериментальное искусство и тщательная логика исследования стали неотъемлемой чертой всех измерений атомных весов. Уже сто лет назад было изучено около трех четвертей из известных нам сейчас почти ста элементов, а их атомные веса измерены с достаточно хорошей точностью.

Если определить химическое соединение как вещество, содержащее составляющие его элементы в неизменных пропорциях, то мы не должны удивляться, узнав, что опыт действительно подтверждает постоянство содержания элементов в любом произвольно выбранном соединении! Итак, поистине удивительные и важные экспериментальные факты заключаются в следующем:

(1) Существует бесчисленное количество веществ, каждое из которых обладает постоянным содержанием составляющих его элементов и определенными физическими[1] и химическими свойствами независимо от того, где оно было найдено или каким путем получено. (Если бы лишь немногие из веществ подчинялись этому правилу, то химия была бы совсем иной. Может быть, она оказалась бы и более простой, но, скорее всего, была бы перегружена изобилием разнообразных смесей.)

(2) Элементы, входящие в различные соединения, находятся между собой в очень простых весовых соотношениях, указывая тем самым на то, что каждый атом одного и того же элемента имеет постоянную характерную массу независимо от того, в какой химической комбинации он находится[2]. Можно только удивляться, что все химические соединения построены по одинаковой схеме, причем каждый элемент обладает одним и тем же атомным весом во всех соединениях, куда он входит.

Откуда же химик берет уверенность, что при построении таблицы атомных весов он не опустил множитель $^1/_2$, или 2, или 3? Если вода была бы HO, то кислород мог бы обладать атомным весом 8, а если гидроокись натрия была бы Na_2OH, то атомный вес натрия стал бы 12,5 (заметим, что сернокислый натрий *и в самом деле* имеет 2 атома натрия в своей молекуле Na_2SO_4). Если же гидроокись натрия оказалось бы $Na(OH)_2$, то атомный вес натрия был бы 46. В ряде случаев такие сомнения действительно возникают, но химики разработали хорошие способы разрешать их и находить правильный множитель. Пример с численными соотношениями между объемами газов позволяет принять нужное решение в случае кислорода и воды. Другое эмпирическое пра-

---

[1] Забегая вперед и вспоминая про изотопы (см. гл. 38, 40, 43), мы можем отчасти усомниться в этом.

[2] Обычная химия ничего не может сказать о величине атомов, хотя имеются четкие основания считать, что атомы должны быть *крайне* малы, а количество их — огромно. Микрохимия, которая имеет дело с миллионными долями грамма, также бессильна почувствовать различие в весе на одну молекулу. Как мы теперь хорошо знаем, мельчайшая крупинка вещества, которую можно непосредственно подержать или взвесить, содержит колоссальное число атомов.

вило, установленное Дюлонгом и Пти, помогает определить атомный вес натрия. Это правило гласит, что для большинства элементов, находящихся в твердом состоянии [1],

$$\text{атомный вес} \cdot \text{удельная теплоемкость} \approx 6.$$

Удельная теплоемкость натрия близка к 0,3. Умножая это число на возможные значения атомного веса натрия, получаем

$$0{,}3\times 12{,}5=3{,}7;\quad 0{,}3\times 23=6{,}9;\quad 0{,}3\times 46=14,$$

т. е. правильным следует признать значение 23.

После создания периодической системы ошибочный выбор стало легко исключать на том основании, что вакантное место имеется только для правильного значения атомного веса. А в начале нынешнего века были созданы специальные приборы — масс-спектрографы (см. гл. 38), которые позволили непосредственно измерить одну за другой массы всех атомов. При подмешивании к исследуемому образцу атомов с известной массой, например водорода и кислорода, служащих в качестве калибровочных точек, масс-спектрограф позволяет получить однозначную шкалу для измерения атомных весов.

Зная атомный вес, мы можем рассчитать и *молекулярный* вес любого вещества, химическая формула которого нам известна. Молекулярный вес — это масса одной молекулы, выраженная в том же масштабе, что и атомные веса. (Не спутайте этот термин с *молем*, который относится к большому макроскопическому количеству вещества и которому можно дать следующее определение: «моль — это количество вещества, масса которого, выраженная в граммах, численно равна его молекулярному весу». В этой книге вы встретитесь и с киломолем, определение которого отличается только тем, что грамм заменяется килограммом.)

Если формула химического вещества нам не известна, но оно находится в газообразном состоянии, то его молекулярный вес (а из него и формулу) нетрудно найти экспериментально. Для этого нужно только измерить веса равных объемов неизвестного газа и, например, водорода, а затем с помощью закона Авогадро найти отношение масс молекул обоих газов. Поскольку мы знаем, что масса молекулы водорода H_2 в нашей шкале, по определению, равна 2, то можем сразу узнать искомую массу молекулы, т. е.

---

[1] Это правило предсказывается кинетической теорией, а квантовая механика объясняет исключения из него. См. гл. 30 и 44.

молекулярный вес вещества. Последний в свою очередь может помочь нам найти атомный вес какого-либо из составляющих его элементов[1]. Для инертных газов, таких, как гелий, не образующих химических соединений, измерение плотности газа — это единственный способ узнать молекулярный вес, который совпадает у них с атомным весом.

Нельзя забывать, что, помимо большой практической ценности использования атомных весов в количественном анализе и химическом синтезе, они сыграли исключительно важную роль в развитии химии. При создании периодической системы элементы первоначально располагались в ней строго по порядку возрастания их атомных весов. Измерения атомных весов выявили одну замечательную особенность: в шкале, где атомный вес водорода равен 1, большинство их оказалось целочисленными. На это свойство указал английский физик Уильям Проут меньше чем через десятилетие после того, как Дальтон выдвинул атомную теорию химии. По мнению Проута, это свойство говорило о том, что атомы каждого химического элемента, по-видимому, построены из одинаковых составных частей, а именно атомов водорода. Такое объяснение выглядело крайне привлекательным не только из-за присущего ученым стремления к простоте, но также и потому, что отвечало традициям древнегреческой философии. Подобная идея

---

[1] Пусть, например, взвешивание газов при комнатной температуре и атмосферном давлении показало, что

Плотность водорода $H_2 = 0{,}0836$ *кг/м*^{3},
Плотность соляной кислоты $HCl(?) = 1{,}52$ *кг/м*^{3}.

Тогда

$$\frac{\text{Молекулярный вес HCl}}{2\,(=\text{мол. вес } H_2)} = \frac{1{,}52}{0{,}0836},$$

т. е. молекулярный вес $HCl = 2 \times 1{,}52/0{,}0836 = 36{,}4$. Таким образом, если формула HCl выбрана правильно, то атомный вес хлора получается $36{,}4 - 1 = 35{,}4$.

Другой пример: мы в состоянии правильно предсказать плотность различных газов, не производя непосредственных измерений. Предположим, что мы хотим сравнить между собой CO_2 и воздух. Воздух содержит $^4/_5$ N_2 (молекулярный вес 28) и $^1/_5$ O_2 (молекулярный вес 32). Таким образом, воздух имеет молекулярный вес 28,8, промежуточный между N_2 и O_2, т. е. он должен быть приблизительно в 14,4 раза тяжелее водорода. Атомный вес углекислого газа CO_2 $(12 + 2 \times 16) = 44$, поэтому его плотность в $44/28{,}8 \approx 1\,^1/_2$ раза больше плотности воздуха, и не удивительно, что он образует иногда удушливые скопления на дне пещер.

Угарный газ, CO, имеющий молекулярный вес $(12 + 16) = 28$, немного легче воздуха.

невольно напрашивается сама, если взглянуть на следующую таблицу:

H	C	N	O	Na	S
(1)	12,0	14,0	16,0	23,0	32,0

Даже во времена Проута не было недостатка в примерах, которые делали эту гипотезу весьма правдоподобной [1]. Однако вскоре нашлись и противоречащие ей исключения: многократные измерения атомных весов Cl и Cu дали значения соответственно 35,45 и 63,5. От гипотезы Проута пришлось отказаться. Блестящая идея, но... пришлось подождать около ста лет, пока она не получила неожиданное объяснение (см. гл. 38 и 40). Это объяснение оказалось совсем необычным. Оно пришло вместе с совершенно новыми взглядами на природу атома, которые позволили предсказать возможность овладения «атомной энергией».

Валентность

Если нам известны атомные веса элементов, то дальнейший анализ покажет, в какой пропорции атомы входят в молекулы соединения. С помощью такого анализа нам удается узнать, что, например, молекула хлористого водорода содержит равное число атомов водорода и хлора, что в метане на каждые четыре водородных атома приходится один атом углерода, что газ ацетилен имеет равное число атомов водорода и углерода, а в хлористом алюминии атомов хлора в 3 раза больше, чем алюминия. Однако, установив пропорцию, мы еще не знаем числа атомов каждого элемента в молекуле. Скажем, хлористый водород мог бы быть HCl или H_2Cl_2, или H_3Cl_3, метан — CH_4, C_2H_8, ..., а ацетилен — CH, C_2H_2... и т. д. Чтобы решить эту задачу, т. е. определить истинную формулу молекулы, необходимо определить ее молекулярный вес.

Если соединение представляет собой газ, то проще всего измерить его плотность и воспользоваться законом Авогадро. Например, пусть измерение плотности газа показало, что

молекулярный вес газообразного хлористого водорода равен 36,4, таким образом, его формула должна быть HCl;

---

[1] В настоящее время в качестве стандарта шкалы атомных весов выбирается атомный вес кислорода, равный 16. При этом атомный вес водорода становится 1,008, но атомные веса других легких элементов еще более приближаются к целым числам.

молекулярный вес метана 16, т. е. его формула CH_4;

молекулярный вес ацетилена 26, т. е. его формула C_2H_2.

При растворении твердых веществ в жидкостях в их поведении проявляется нечто общее с газами. К примеру, они создают некоторое добавочное давление на тонкие пленки из некоторых материалов, так называемое «осмотическое давление», которое нетрудно измерить. Кроме того, они немного меняют точку кипения и точку замерзания жидкости. Величина каждого из этих эффектов пропорциональна числу молекул (или ионов) растворенного вещества, и измерение любого из них позволяет оценить молекулярный вес.

Зная формулу молекулы, мы можем по-новому описать образование химического соединения, воспользовавшись очень удобным понятием *валентности*. Возьмем простые молекулы, состоящие из двух атомов, HCl, $NaCl$, H_2, и вообразим, что каждый из атомов снабжен своеобразной связью, с помощью которой он может соединиться с соответствующей связью другого атома. Поэтому мы можем изобразить атомы в виде H—, Cl—, Na—, а соединения—в виде H—Cl и т. д. Однако нам известны и другие соединения: H_2O, $CaCl_2$, CaO, которые показывают, что у атомов кислорода и кальция должно быть уже по две связи —O— (или O=), ... «Число таких связей» каждого атома мы называем *валентностью*. Водород, хлор, натрий, как и некоторые радикалы, например (OH), обладают валентностью 1, они *одновалентны*. Кислород, кальций, а также радикал сульфат (SO_4) имеют валентность 2. Валентность алюминия 3 (хлористый алюминий — это $AlCl_3$). Формулы метана CH_4 и углекислого газа CO_2 показывают, что валентность углерода 4.

Это свойство углерода позволяет ему образовывать бесчисленное разнообразие соединений. Длинная цепочка радикалов —CH_2—, изображенная в гл. 6, — лишь одна из тысяч типов таких цепочек, одно из многих миллионов его соединений. К ним мы еще вернемся, когда будем говорить об «органической» химии.

Некоторые из атомов, по-видимому, проявляют различную валентность. Медь имеет валентность 2 в сульфате меди $CuSO_4$ и в одном из окисных соединений — CuO. Одновременно она способна образовывать закись Cu_2O, ведя себя как одновалентный элемент. Точно так же валентность азота может быть 3 (вспомним газ аммиак NH_3) или 5, но иногда 1 и даже 6.

Валентность — характерное для нормального поведения элемента свойство, которое помогает запомнить и объяснить химические превращения, а также изобразить структурные формулы

сложных молекул. Здесь мы дали только общепринятое и грубое представление о валентности. Современные химики различают несколько видов валентности, точнее, типов *связей* между атомами. Они объясняют эти связи электрическими силами, которые удерживают положительные и отрицательные ионы друг подле друга. В некоторых случаях такая связь возникает из-за того, что электроном совместно владеют два атома.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

С развитием химии, сопровождавшимся исследованием свойств элементов и измерением их атомных весов, а также свойств широких классов соединений, возникла потребность в некоторой общей упорядочивающей схеме. Создавшаяся ситуация чем-то напоминала ту, в которой оказывается юный коллекционер почтовых марок, когда он сталкивается с изобилием марок какого-либо государства. Если он догадается расположить их отдельными рядами друг под другом, так чтобы каждый ряд отвечал одинаковому году выпуска, а столбец — стоимости марки, то легко подметит некоторые общие для всех выпусков закономерности, скажем, что «все почтовые марки достоинством в 1 цент — зеленого цвета». Возможно, он не удержался бы от соблазна сделать и другие, иногда слишком поспешные выводы. Однако польза выбранной им системы заключается только в том, что она устанавливает определенный порядок. Химические элементы ставят перед нами гораздо более трудную, но и более важную задачу. Выстраивая их в *порядке возрастания атомных весов*, Менделеев (~1869 г.) и другие ученые увидели, что некоторые основные химические свойства элементов регулярно повторяются наподобие того, как каждый новый выпуск почтовых марок начинается с зеленой марки стоимостью в 1 цент. Однако химические свойства не столь очевидны, как цвета почтовых марок. Поэтому, коль скоро вы не изучали химию, это поразительное повторяющееся сходство, возможно, и не произведет на вас должного впечатления. Мы не будем пытаться вовлечь вас в дискуссию по вопросам химии, а просто расскажем о некоторых выводах, следующих из периодической системы, и приведем примеры действенности ее предсказаний. (См. таблицу, которая помещена двумя страницами ниже.)

Начнем с самых легких элементов: водорода (1), гелия (4), лития, бериллия, бора, углерода и т. д. в порядке возрастания атомного веса. Мы увидим перед собой последовательность абсолютно не схожих друг с другом легких элементов. Оставив в

стороне простейшие из них — водород и гелий,— перейдем к ряду, содержащему восемь элементов. Элементы, идущие за ними, повторяют многие свойства этого ряда, поэтому следующие восемь элементов мы запишем во втором ряду, располагая его ниже первого, в результате чего получим столбцы «семейств» или групп элементов со сходными свойствами. Будем продолжать в том же духе, переходя ко все более тяжелым атомам и не всегда заканчивая ряд на восьмом элементе, а иногда удлиняя его, если это диктуется химическими свойствами[1)].

После того как элементы разместятся в таблице, мы заметим, что «щелочные металлы» — литий, натрий, калий, рубидий, цезий и недавно открытый франций — окажутся в одном столбце. Все они мягкие, химически активные металлы, которые с жадностью вступают в реакцию с водой, вытесняя из нее водород и образуя едкие щелочные, мыльные на ощупь растворы. Атомы каждого из этих металлов одновалентны, т. е. имеют всего одну химическую связь и потому соединяются с одновалентным хлором, образуя хлориды, например хлористый натрий. С физической точки зрения эти металлы характерны тем, что позволяют получать хорошие светочувствительные поверхности, так как свет легко вырывает электроны из их атомов, и применяются для изготовления фотоэлементов (электронных глаз). В настоящее время мы считаем, что их химические и физические свойства тесно связаны между собой: электрон, который легко выбивается из атома под действием света, так же легко заимствуется другим атомом, например атомом хлора.

В середине первого столбца появляется вторая подгруппа, состоящая из менее активных металлов, которые перемежаются с металлами первой подгруппы. Здесь мы встречаемся с медью и такими «благородными» металлами, как серебро и золото. Второй столбец содержит уже металлы с валентностью 2, к которым относятся бериллий, кальций, барий, стронций и радий. Сульфаты этих металлов не растворимы в воде (например, $CaSO_4$ — обожженный гипс, или алебастр, который используется также в качестве мела для классных досок, и $BaSO_4$, хорошо поглощающий рентгеновские лучи и применяемый в медицине при просвечивании желудочного тракта). Здесь присутствует и вторая подгруппа — цинк, кадмий, ртуть (сульфаты которых уже растворимы), по-прежнему обладающая валентностью 2.

[1)] Еще лучше было бы записать ряды элементов на ленте, обернутой спиралью вокруг цилиндра. При таком расположении красота периодической системы становится более очевидной.

В правой части таблицы тоже имеется столбец с очень активными элементами, на этот раз уже *неметаллами* — фтором, хлором, бромом и йодом. Все они соединяются с водородом, образуя кислоты, все оставляют ожоги на коже, хотя в малых дозах хлор и йод могут быть полезны, так как обладают бактерицидным действием. Плотность и агрессивность этих элементов меняются вдоль столбца по мере возрастания атомного веса. Фтор представляет собой легкий желтоватый едкий газ, этакий необузданный злодей, который действует без разбора почти на любые вещества — от платины до человеческого тела. Хлор — это тяжелый зеленый ядовитый газ, который способен разрушить ваши гортань и легкие. Бром, самый яркий по окраске член семейства, — едкая красно-коричневая жидкость, легко превращающаяся в пары́ коричневого цвета, всегда готовый обжечь вам кожу, если вы посмеете к нему прикоснуться. И, наконец, йод — наиболее спокойный из них, который при комнатной температуре образует темные кристаллы, но легко возгоняется при нагревании, образуя фиолетовые пары. Каждый из этих элементов соединяется с калием, натрием, кальцием и любым другим металлом, образуя соли.

Элементы в столбцах, расположенных ближе к середине таблицы, не выказывают столь же очевидных для не химика общих свойств, но искушенный специалист тоже различит там строгую упорядоченность. Средний столбец начинается, как и другие, похожими друг на друга элементами — углеродом и кремнием. Оба эти элемента — неметаллы, их валентность равна 4, они образуют с водородом сходные соединения CH_4 и SiH_4, а с двухвалентным кислородом CO_2 и SiO_2 (песок). Но затем семейство как будто разделяется на две родственные линии — титан, цирконий, гафний в одной, и германий, олово, свинец в другой. Обе ветви в своих последующих поколениях все более приобретают металлические свойства.

Инертные газы — гелий, неон, аргон — даже не были известны в период создания периодической системы. Когда спустя примерно тридцать лет они были открыты, для них пришлось учредить отдельный столбец. Но, получив «прописку», они образовали специфическую группу, целое семейство химических тунеядцев — полностью инертных, не способных образовывать какие-либо соединения. Сейчас их принято называть «благородными газами». В отличие от водорода, кислорода и других газов, которые существуют в форме H_2, O_2 и т. д., их атомы не способны даже соединяться в молекулы и проводят свою жизнь в одиночестве. По-

следнее утверждение на первый взгляд может показаться просто выдумкой. В самом деле, если эти газы не образуют химических соединений, если они позволяют себе игнорировать химию, то

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

— МЕТАЛЛЫ — — — —					— — — НЕМЕТАЛЛЫ			
ГРУППА I	ГРУППА II	ГРУППА III	ГРУППА IV	ГРУППА V	ГРУППА VI	ГРУППА VII	ГРУППА VIII	ГРУППА 0
Подгруппа А Подгруппа Б Щелочные металлы Благородные металлы	Подгруппа А Подгруппа Б	А (Б)	А (Б)	(Б) А	(Б) А	(Б) А Галогены	Триплеты металлов	Инертные газы
1 Водород m = 1,008								2 Гелий m = 4,00
3 Литий m = 6,94	4 Бериллий m = 9,02	5 Бор m = 10,82	6 Углерод m = 12,01	7 Азот m = 14,01	8 Кислород m = 16	9 Фтор m = 19,0		10 Неон m = 20,2
11 Натрий m = 23,0	12 Магний m = 24,3	13 Алюминий m = 27,0	14 Кремний m = 28,1	15 Фосфор m = 31,0	16 Сера m = 32,1	17 Хлор m = 35,46		18 Аргон m = 39,94
19 Калий m = 39,10	20 Кальций m = 40,1						26 Железо, 55,8 27 Кобальт, 58,9 28 Никель, 58,7	
29 Медь m = 63,6	30 Цинк m = 65,4					35 Бром m = 79,9		36 Криптон m = 83,7
37 Рубидий m = 85,5	38 Стронций m = 87,6						44 Рутений, 101,7 45 Родий, 102,9 46 Палладий, 106,7	
47 Серебро m = 107,9	48 Кадмий m = 112,4					53 Иод m = 126,9		54 Ксенон m = 131,3
55 Цезий m = 132,9	56 Барий m = 137,4						76 Осмий, 190,2 77 Иридий, 193,1 78 Платина, 195,2	
79 Золото m = 197,2	80 Ртуть m = 200,6		82 Свинец m = 207,2					86 Радон m = 222
87 Франций	88 Радий m = 226,0	89 Актиний m = 227	90 Торий m = 232,1	91 Протактиний	92 Уран m = 238,1	93 Нептуний	94 Плутоний	

В средней части таблицы сходство элементов каждой группы не столь очевидно.

Полную систему можно найти в любом руководстве по химии

Фиг. 168. Периодическая система элементов Менделеева.

можно ли вообще установить их атомный вес и доказать, что он совпадает с молекулярным? И все же мы уверены, что это так. Вы уже видели в гл. 30, как измерения удельной теплоемкости,

опиравшиеся на надежную физическую теорию, позволяют твердо установить, что молекулы благородных газов содержат по одному атому.

Периодическая система химических элементов удобна не только для запоминания их свойств или выбора последовательности изучения, но обладает всеми достоинствами, присущими самым замечательным теориям и концепциям. Она позволила предсказать свойства еще не открытых элементов, для которых остались пустые клетки. Одновременно периодическая система ставит перед нами ряд новых проблем — от причин нарушения расположения элементов по возрастанию атомного веса[1] до кардинальных вопросов о структуре атомов, знание которой позволило бы объяснить саму периодичность свойств элементов.

Часть периодической системы элементов приведена на фиг. 168. Полную систему с более подробными объяснениями и поучительными описаниями поисков отсутствующих элементов, свойства которых она предсказывала и которые в конце концов заполнили ее пустующие клетки, вы найдете в учебниках химии.

АТОМНЫЕ НОМЕРА

Атомные номера в периодической системе химических элементов

Первоначально система химических элементов была составлена по возрастанию атомного веса. После того как такое расположение было признано удачным, казалось естественным присвоить каждому элементу порядковый номер, аналогично тому как поступает филателист, нумеруя по порядку свои марки[2].

---

[1] Один из примеров такого нарушения виден в той части системы, которая приведена на фиг. 168. Инертный газ аргон и активный щелочной элемент калий, имеющие атомные веса соответственно 40 и 39, казалось бы, нужно поменять местами. Однако многочисленные попытки обосновать такую возможность тщательными измерениями полностью провалились. Было ли это случайной неудачей периодической системы или ее пороком в целом? Нет, этот пример, конечно, не мог ее полностью дискредитировать, поскольку в активе периодической системы имелось уже немало достижений. Однако он оказался весьма серьезным «исключением», которое грозило остаться незаживающей раной на теле химии. Все же современной физике удалось объяснить причину этого несоответствия, вернее показать, что его вообще не существует. См. гл. 38.

[2] Имеется определенная система присвоения почтовым маркам порядковых номеров, которые называются «числами Скотта». Атомные номера — это своеобразные «числа Скотта» химических элементов.

С химической точки зрения эти номера очень удобны, и мы запишем их над каждым элементом нашей системы. (Из книг по химии вы узнаете, что эти номера имеют гораздо более глубокое значение: они соответствуют числу электронов в атоме. Однако это объяснение дается уже атомной физикой, и мы будем рассказывать о нем в последующих главах.) Таким образом, мы приписываем водороду номер 1, гелию номер 2 ... и так вплоть до элемента номер 92 — урана.

Длительное время мы не знали, считать ли уран последним элементом периодической системы или за ним существуют другие элементы. Сейчас мы уже научились получать элементы с номерами 93, 94 и т. д., бомбардируя атомными частицами тяжелые атомы. Возникла новая, «ядерная» химия, перспективы которой поразительны. Мы можем заглянуть еще дальше и предугадать свойства атомов, гораздо более тяжелых, чем любые известные нам сейчас. Как и атомы с номерами от 84 до 102, они будут нестабильны (радиоактивны), причем должны распадаться настолько быстро, что не стоит удивляться, если они вообще не существуют в природе[1].

Современные представления об атомном номере

В наши дни мы рассматриваем атомный номер как основную характеристику химического элемента. Мы знаем, что он представляет собой величину положительного электрического заряда атомного ядра, измеренную в единицах заряда электрона. Таким образом, атомный номер говорит нам, сколько электронов содержится в электрически нейтральном атоме. Распределение и энергия связи этих электронов зависят от заряда ядра, и поскольку поведение элемента определяется числом внешних электронов, которыми его атомы обмениваются в химических реакциях, то можно сказать, что химические свойства элемента зависят от заряда ядра, т. е. атомного номера. Внутренние электроны атома, крепко удерживаемые его ядром, почти не принимают участия в химических реакциях, за исключением разве лишь самых легких атомов, в которых число электронов невелико. Поэтому сближение

[1] Теоретические оценки, основанные на так называемой оболочечной модели атомного ядра, показывают, что с ростом атомного номера снова могут появиться более стабильные элементы. Так, например, вполне возможно, что один из элементов с атомными номерами 114 и 126 или оба будут сравнительно устойчивы. — *Прим. перев.*

атомов, происходящее при образовании химического соединения, не может создать силы, достаточные для того, чтобы заставить внутренние электроны заметно изменить свои состояния. Однако внутренние электроны ответственны за испускание и поглощение рентгеновских лучей. Если вырвать из атома внутренний электрон, например бомбардируя его другими атомными частицами, то как только соседний электрон займет его место, атом испустит рентгеновский квант, *длина волны которого характеризует заряд атомного ядра*. Таким образом, изучая рентгеновские лучи, испускаемые мишенями, изготовленными из различных элементов, мы можем определить атомный номер этих элементов. Поступая таким образом, мы узнаем положение элемента в системе, не прибегая к измерению атомных весов, и поэтому можем надеяться, что не обойдем ни одного из них. Для этого способа безразлично, находятся ли элементы в свободном состоянии или в соединении с другими. Он с абсолютной достоверностью дает нам атомный номер, т. е. заряд атомного ядра, свой для каждого элемента.

Атомы радиоактивных элементов неустойчивы, и хотя они обладают всеми свойствами, присущими отдельному элементу,— определенными химическим поведением, атомным номером и не обнаруживают никаких признаков делиться на еще более элементарные составные части, эти свойства сохраняются у них не вечно. Один за другим атомы радиоактивного элемента внезапно превращаются в атомы другого элемента. Спустя некоторое время количество первоначального (родительского) элемента сокращается за счет появления соответствующего количества другого (дочернего) элемента. Последний обладает всеми свойствами самостоятельного химического элемента (поэтому в свою очередь тоже может быть радиоактивным) и занимает соответствующее место в другом столбце периодической системы. В момент превращения атом выбрасывает мельчайшие осколки — альфа- и бета-частицы (а часто и гамма-лучи), обладающие колоссальной энергией. Излучение, или «радиация», таких частиц нестабильными атомами было первым обратившим на себя внимание свойством этих элементов, поэтому процесс самопроизвольного распада атомов и был назван радиоактивностью (см. гл. 39 и 43).

Альфа- и бета-частицы, вылетающие из атомного ядра, уносят электрический заряд, поэтому меняют заряд ядра, а следовательно, и атомный номер элемента, сдвигая его в другое место периодической системы. (С химической точки зрения причина, которая заставляет нас отнести новый атом к другому столбцу таблицы химических элементов, заключается в том, что с изменением за-

ряда ядра меняется и его атомный номер, т. е. число и конфигурация атомных электронов, а следовательно, и химические свойства.)

Открытие радиоактивности могло бы заставить нас пересмотреть прежнее определение элемента как раз и навсегда неизменной простой субстанции, но нас спасает атомный номер. Атомный номер присущ только элементу; исследование любого соединения даст лишь атомные номера составляющих его элементов.

До начала нынешнего века казалось, что атомный вес столь же хорошо определяет химический элемент, как и атомный номер. Тщательный количественный химический анализ давал всегда одно и то же значение атомного веса элемента. Это казалось настолько естественным, что принималось как само собой разумеющееся. Затем оказалось, что атомный вес свинца, извлеченного из различных руд, немного различается. Могли ли существовать два сорта атомов свинца — легкие и тяжелые? Последующее изучение с помощью масс-спектрографов показало, что большинство элементов представляет собой смесь атомов с немного различающимися атомными весами. Атомные веса, полученные в результате химических измерений, являются средними значениями нескольких различных атомных весов, сложенных в пропорции, которая в окружающем нас мире, по-видимому, всегда остается неизменной. Что же представляют собой настоящие атомные веса? В какой степени их новые измерения спасают дискредитированную гипотезу Проута? Это мы увидим в последующих главах. Здесь же мы расскажем еще об одной причине, которая дает основания считать, что атомный номер лучше характеризует свойства элементов, чем атомный вес.

ЭЛЕКТРОЛИЗ

Электрохимия

Электрический ток легко проходит через водные растворы кислот, щелочей и солей, что говорит о существовании в таких растворах носителей тока. Как вы уже, наверно, догадались, этими носителями являются *ионы*, что по-древнегречески означает «несущий». В большинстве водных растворов даже небольшое напряжение без всякого труда и задержки вызывает электрический ток, поэтому можно думать, что ионы присутствуют во всем растворе и под действием приложенного электрического поля способны переносить заряды, создавая электрический ток. Мы знаем, что и в некоторых твердых кристаллах «+»- и «—»-заряды тоже сосре-

доточены на ионах, например кристалл хлористого натрия представляет собой кубическую решетку ионов Na^+ и Cl^-. Атомы натрия и хлора обменялись электроном и превратились в ионы, притяжение которых и обеспечивает устойчивость кристалла[1].

Будем последовательно пропускать электрический ток через несколько ванн с растворами, погрузив туда металлические проводники (электроды). В раствор сернокислой меди $CuSO_4$ опустим медные электроды, в ванну с водой (+кислота) — некорродирующие угольные или платиновые электроды, в ванну с соляным раствором — электроды специальной конструкции, позволяющие улавливать газообразные продукты и предотвращать их химическое взаимодействие с водой. По мере прохождения тока на каждом электроде выделяется некоторое количество вещества. Если пропускать ток вдвое дольше или удвоить силу тока, то количество полученного продукта тоже удвоится. Таким образом, масса вещества, выделившегося на каждом электроде, прямо пропорциональна произведению: ТОК·ВРЕМЯ или ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ЗАРЯДУ, который прошел через ванну. Но масса каждого продукта определяет число выделившихся на электроде атомов, т. е.

ЧИСЛО АТОМОВ $\sim$ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД, ПРОШЕДШИЙ ЧЕРЕЗ РАСТВОР,

или

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД $\sim$ ЧИСЛО АТОМОВ.

---

[1] Это не просто блестящая догадка, а четкое заключение, сделанное на основании исследования атомных слоев в кристаллах соли рентгеновскими лучами. Рентгеновские лучи, отраженные от наклонных плоскостей кубического кристалла, образуют дифракционную картину, которая показывает, что они проходят через слоистую среду, состоящую из большого числа неодинаковых слоев, в которой периодически встречаются слои, содержащие большее число электронов, т. е. сильнее рассеивающие рентгеновские лучи. Ими могут быть только плоскости кристалла, содержащие хлор, атомный номер которого 17 больше атомного номера натрия — 11. Повторяя эксперимент с хлористым *калием*, в химическом отношении сходным с NaCl и имеющим почти идентичную кристаллическую структуру, английский ученый сэр Уильям Брэгг обнаружил удивительное различие. Наклонные плоскости кристалла KCl создавали дифракционную картину, которая свидетельствовала о полной *тождественности* всех плоскостей, т. е. о том, что все они одинаково богаты электронами. Взгляните теперь на атомные номера калия и хлора в периодической системе химических элементов. Они дадут вам число рассеивающих рентгеновские лучи электронов нейтрального атома. Как же могло случиться, что все атомы кристалла стали обладать одинаковым количеством электронов? И на какие другие атомы стали похожи эти новые образования по своей электронной структуре? (Посмотрите на систему снова.) Можно ли ожидать, что они когда-нибудь вернутся в исходное состояние или навсегда останутся в кристалле такими?

Последнее утверждение означает, что существуют элементарные носители электрического тока — атомы или группы атомов, несущие некоторый постоянный заряд, так сказать «атомы» электричества верхом на атомах материи.

Далее, массы продуктов, появившихся на различных электродах под действием одинакового заряда, прошедшего через растворы, находятся в весьма многозначительных соотношениях. Так, если под действием электрического тока выделился 1 *кг* водорода, то тот же самый ток за то же самое время дает 23 *кг* натрия или 35,4 *кг* хлора или 108 *кг* серебра. Эти массы пропорциональны атомным весам продуктов. Следовательно, все они содержат одинаковое число атомов. Разделив массу продуктов на число атомов, мы узнаем массу отдельного атома, переносящего в каждом случае тот же самый заряд. При этом подразумевается, что ионы — это *отдельные атомы*, которые всегда несут равный электрический заряд, одинаковый для каждого атома элемента[1]. Мы используем такое представление, обозначая ионы знаками «+» и «—», соответствующими одному единичному электрическому заряду (который, как мы теперь знаем, равен заряду электрона), т. е.



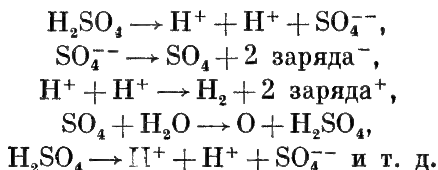
$$H^+ \ Na^+ \ Cl^- \ Ag^+.$$

Однако, когда при электролизе воды выделяется 1 *кг* водорода, то одновременно получается 8, а не 16 *кг* кислорода, а в ванне с раствором сернокислой меди выделяется только 31,8 *кг* меди (с атомным весом 63,6). Это говорит о том, что *либо* тот же самый заряд переносится половинками атомов кислорода и меди, *либо* целые атомы этих элементов несут двойной заряд. Безусловно, мы должны выбрать вторую возможность. При этом ион меди приходится обозначать Cu^{++}. Для того чтобы пропустить через раствор одно и то же количество электричества, понадобится вдвое меньше таких ионов, чем, скажем, ионов водорода. (Мы пока подождем говорить об ионе O^{++}. Кислород получается при электролизе как вторичный продукт, и настоящими носителями являются не ионы кислорода.) Заметим, что кислород и медь имеют валентность 2. Возможно, что все ионы атомов с валентностью 2 несут двойной заряд. Измерение выхода кальция и цинка при электролизе раст-

[1] Наблюдения, безусловно, *не доказывают*, что имеет место такая простая картина. Самое большее, что мы можем сказать, заключается в следующем: поскольку такое объяснение является самым простым, мы предпочитаем с ним согласиться, пока оно не будет опровергнуто новыми экспериментальными данными. Такой выбор не таит в себе ничего плохого, если мы не будем забывать, что сделали его из соображений удобства.

воров их солей подтверждает это предположение. Исследуем также алюминий, валентность которого 3, а атомный вес 27. Мы сможем убедиться, что тот ток·время, который необходим для получения 1 *кг* водорода, даст не 27, а только 9 *кг* алюминия. Таким образом, ион алюминия — это Al^{+++}.

Некоторые ионы составлены из целой группы атомов. Вода, например, расщепляется на ионы H^+ и OH^-, каустическая сода — на ионы Na^+ и OH^-, серная кислота — на H^+, H^+ и SO_4^{--}. Чистая вода бедна ионами, бо́льшая ее часть существует в виде молекул H_2O или составленных из этих молекул групп. Поэтому, чтобы облегчить электролиз воды, нужно обогатить ее ионами, например, добавляя туда H_2SO_4. Это значительно увеличивает содержание ионов H^+ и дает также много ионов SO_4^{--}. Когда ионы SO_4^{--} подходят к электроду, они отдают ему свои два отрицательных заряда и одновременно взаимодействуют с окружающими молекулами воды, образуя кислород и H_2SO_4, которая снова расщепляется на ионы[1]. То есть



$$H_2SO_4 \longrightarrow H^+ + H^+ + SO_4^{--},$$
$$SO_4^{--} \longrightarrow SO_4 + 2 \text{ заряда}^-,$$
$$H^+ + H^+ \longrightarrow H_2 + 2 \text{ заряда}^+,$$
$$SO_4 + H_2O \longrightarrow O + H_2SO_4,$$
$$H_2SO_4 \longrightarrow H^+ + H^+ + SO_4^{--} \text{ и т. д.}$$

Таким образом, кислота не расходуется, и по окончании длительного электролиза ее остается столько же, сколько было вначале, но количество воды уменьшается за счет появления водорода и кислорода.

Электролиз и ионы

При электролизе раствора сернокислой меди ионы Cu^{++} отдают отрицательному электроду свои заряды и осаждаются на нем (независимо от того, из чего он сделан), превращаясь в незаряженные атомы. Ионы SO_4^{--} идут к другому электроду и, если он изготовлен из меди, то взаимодействуют с ним, образуя сульфат меди. Таким образом, суммарный эффект состоит в том, что чис-

[1] Если электроды сделаны из свинца, ионы SO_4^{--} соединяются с ним, образуя сернокислый свинец. Эта реакция является частью процесса зарядки аккумуляторов. Если же электроды сделаны из меди, то они тоже соединяются с ионами SO_4^{--}. При этом вместо кислорода и серной кислоты образуется сернокислая медь, которая также расщепляется на ионы.

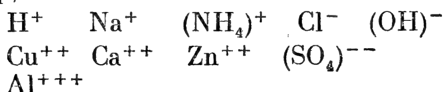
тая медь просто-напросто переносится с одного электрода на другой, без какой-либо убыли сульфата меди. В результате один электрод омедняется, а с другого медь постепенно переходит в раствор.

+ =
− =
ИОНЫ
КРИСТАЛЛ СОЛИ
ЭЛЕКТРОЛИЗ
+ −

Фиг. 169. Ионы, из которых составлены кристаллы поваренной соли, при растворении соли переходят в раствор.

Если к раствору приложено электрическое поле, то эти ионы становятся носителями электрического тока. (Изображение кристалла соли взято из статьи П. Р. Роуленда, опубликованной в Science News, № 15, март 1950 г.)

Итак, мы узнали, что растворы кислот, солей и т. п. содержат ионы, например,



H^+ Na^+ $(NH_4)^+$ Cl^- $(OH)^-$
Cu^{++} Ca^{++} Zn^{++} $(SO_4)^{--}$
Al^{+++}

Когда к таким растворам подводится постоянное напряжение, то создается электрическое поле, заставляющее ионы двигаться через раствор. Ионы с зарядом «+» движутся в обычном для электрического тока направлении (от «+» к «—»). Ионы с зарядом «—» перемещаются в обратном направлении. Перенос электрического тока осуществляется обоими типами зарядов. Если хотите, движение этих зарядов и *есть* электрический ток. Увлекаемые электрическим полем ионы дрейфуют в противоположных направлениях (чаще всего с различной скоростью), одновременно участвуя в хаотическом движении молекул воды. (Вблизи электрода электрическое поле очищает раствор от ионов одного знака, и ионы другого знака вынуждены спешить, чтобы самим осуществить весь электрический ток.) Поскольку каждый из ионов обязательно достигает своего электрода, то в конце концов его заряд нейтрализуется (фактически ион теряет лишние или приобретает недостающие электроны). Заряд уходит дальше по электрической цепи, а образовавшиеся незаряженные атомы вступают в контакт с водой и металлическим электродом и ведут себя так, как им велит их химическая природа. Например, ионы меди (которые в растворе имеют голубой цвет), попадая на электрод, захватывают два электрона и превращаются в два атома красной меди, прочно пристающие к электроду. В отличие от них ионы натрия, становясь нейтральными атомами металлического натрия, взаимодействуют с водой, вытесняя из нее водород и образуя щелочь едкий натр.

Законы Фарадея

Большей части наших сегодняшних представлений об ионах и электролизе мы обязаны Майклу Фарадею, который получил их практически из ничего, на самой заре экспериментов с электрическими токами. В серии замечательных опытов, основанных на точном предвидении, он изучил явления, происходящие при электролизе (которому он и дал это название), и свел все их разнообразие к двум простым законам, впоследствии заслуженно получившим его имя. Открытые им законы (~1833 г.) можно сформулировать следующим образом:

I. Независимо от состава раствора и материала электродов масса вещества, образованного на электродах, прямо пропорциональна произведению ТОК·ВРЕМЯ, или КОЛИЧЕСТВУ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА,

II. При одинаковом количестве электричества масса вещества, полученного на различных электродах, пропорциональна

химическому эквиваленту вещества, т. е. $\sim \frac{\text{атомный вес}}{\text{валентность}}$.

Ионы в растворе

Имеются убедительные свидетельства того, что участвующие в электролизе ионы возникают в растворе сразу, и растворенные молекулы не ждут, пока их разобьет на части электрическое поле, которое мы прикладываем к раствору, чтобы пошел электрический ток. Это доказывается следующими наблюдениями:

1) Чтобы начался электролиз, достаточно лишь небольшого постоянного напряжения. (Некоторое дополнительное начальное напряжение связано с эффектом обратного тока, который создается *продуктами* электролиза, образующими мельчайшие источники электрического тока около электродов. При электролизе раствора сернокислой меди с медными электродами такого эффекта не обнаруживается, и ток следует закону Ома, однако если электроды изготовлены из инертного материала, например платины, то эффект *существует*. Он проявляется также и при электролизе воды. См. опыты 17 и 18 в гл. 32.)

2) Когда мы пытаемся измерить молекулярный вес растворенной соли (по ее «осмотическому давлению» или изменению точки замерзания раствора), мы замечаем, что растворенных частиц стало почти вдвое больше по сравнению с тем, чего можно было бы ожидать, если бы молекулы оставались целыми. Это говорит о том, что они расщепились на ионы. С другой стороны, для растворов, которые не проводят электрического тока, например растворов сахара, молекулярный вес растворенного вещества получается нормальным, потому что оно не образует ионов.

3) Такое утверждение хорошо согласуется с известными химическими свойствами вещества. Выпадение твердого осадка или образование газа, пузырьками выходящего наружу, как мы себе представляем, происходит в результате встречи ионов противоположного знака, которые нейтрализуют друг друга и соединяются с образованием продукта, уходящего из раствора. Ионы — это активные посредники большинства химических реакций, происходящих в растворах.

Число Фарадея и отношение e/M для ионов

Измерения показывают, что для получения 1,008 *кг* водорода необходимо 96 500 000 *кулон* электричества. Тот же самый заряд дают 35,4 *кг* хлора, (16,00/2) *кг* кислорода или (63,6/2) *кг* меди. (Количество электричества, необходимое для получения одного химического эквивалента вещества, выраженное в граммах, мы называем числом Фарадея или сокращенно «фарадеем», а если масса вещества выражена в килограммах, то «килофарадеем».) Рассчитаем отношение заряд/масса для одного иона водорода (протона), *предполагая, что все они одинаковы*:

$$\frac{e}{M} = \frac{96\,500\,000}{1,008} = 95\,700\,000 \text{ кулон/кг.}$$

Отношение заряда к массе для иона меди равно

$$3\,034\,000 \text{ кулон/кг.}$$

(Обратной величиной: 0,000 000 329 *кг* меди/*кулон* мы уже пользовались в гл. 32, когда давали определение ампера.)

Ионы, электроны и периодическая система химических элементов

Забегая вперед в область физики, занимающейся моделями атома, набросаем здесь схему простой теории атома. Мы представляем атомы в виде облака электронов, окружающего центральное ядро, с которым внутренние электроны очень сильно, а внешние более слабо связаны электрическими силами. Атомы элементов первого столбца периодической системы (литий, натрий и т. д.) имеют один слабо связанный электрон, который с легкостью переходит к другим атомам. Этот электрон бóльшую часть времени проводит вне компактной группы внутренних электронов, сконцентрированных ближе к ядру. Именно такая компактная группа окружает ядро атомов элементов, принадлежащих нулевому столбцу. Там нет электронов, которые можно легко вырвать из атома, а следовательно, нет и способности образовывать ионы, нет и химических соединений. Элементы первого столбца охотно отдают свой единственный внешний электрон, и их атомы участвуют в химических реакциях в виде однократно заряженных ионов. Если эти элементы находятся в твердом состоянии и к ним прикладывается электрическое поле, то такие электроны практически беспрепятственно переходят от атома к атому, создавая электриче-

ский ток. Поэтому можно ожидать, что элементы первой группы будут хорошими проводниками. И действительно, все элементы первого столбца — металлы, очень хорошие проводники электричества.

Атомы элементов второго столбца имеют по два внешних электрона, не входящих во внутреннюю стабильную группу, теряя которые, они становятся ионами$^{++}$. Эти элементы также являются металлами и хорошо проводят электрический ток.

Теперь напрашивается новое объяснение столбцов периодической системы. Номер столбца отвечает валентности, т. е. числу слабо связанных внешних электронов. Посмотрев на алюминий, находящийся в третьем столбце таблицы и имеющий ионы Al^{+++}, мы можем ожидать, что он имеет три внешних электрона.

Обращаясь к седьмому столбцу, мы не будем говорить, что входящие в него элементы обладают семью слабосвязанными внешними электронами, а скажем, что здесь имеется *почти* замкнутая инертная группа, похожая на те, которые окружают атомы элементов нулевого столбца. И в самом деле, характер электронного облака атомов элементов седьмого столбца таков, что *требуется еще только один* электрон, чтобы образовалась замкнутая группа. Поэтому не нужно удивляться, что фтор, хлор и другие элементы этого семейства с готовностью отбирают электрон (у натрия, воды и почти у всех других веществ), образуя отрицательные ионы. Откуда мы знаем, что для образования замкнутой группы достаточно одного добавочного электрона? Чтобы понять это, взгляните на нулевой столбец, который находится в преддверии седьмого столбца.

Все эти причины заставляют нас рассматривать валентность как меру сродства атомов к электронам. Например, электрон атома натрия захватывается хлором, и образуется ионная молекула $Na^+—Cl^-$. Оба эти иона, если забыть об их избыточном электрическом заряде, очень похожи на атом инертного газа. Именно поэтому мы и наблюдаем сильное притяжение, придающее кристаллам прочность, сильные ионные свойства, но не обнаруживаем тенденции к повторному обмену электронами, который мог бы дать новые химические свойства.

Задача

Что, по вашему мнению, происходит с атомами кальция и хлора при соединении их в хлористый кальций, если основываться на представлении об образовании устойчивых *электронных групп при обмене атомов электронами?*

Притяжение между ионами — это не единственная форма химической связи. В некоторых соединениях такая связь осуществляется за счет того, что несколько атомов совместно *владеют* одним или более электронами, находящимися между ними. Чтобы объяснить происхождение валентности такого типа и предсказать саму ее возможность, необходимо привлечь современную квантовую теорию, или «волновую механику».

«Физическая» связь между отдельными молекулами тоже возникает благодаря смещению электронов одной молекулы под действием электрического поля другой, в результате чего заряды молекул «раздвигаются» [+ ... —] и молекулы поляризуются. Затем они поворачиваются и сближаются таким образом, что заряд одной молекулы оказывается вблизи заряда противоположного знака другой молекулы, а возникающие при этом силы притяжения обеспечивают устойчивость связи. Механизм такого взаимодействия также описывается квантовой теорией.

Молекулы воды

При растворении солей в воде ионы, по-видимому, образуются очень охотно, но нет даже намека на то, что они возникают в таких растворителях, как, скажем, бензол. Мы считаем, что сама молекула воды, которая может образовать ионы H^+ и OH^-, электрически поляризована и имеет на одном конце заряд «+», а на другом «—».

Известно, что водяные пары легче конденсируются на электрически заряженных частицах. Особенно легко капли тумана образуются на ионах газов (см. гл. 39, где описано, как это свойство используется в камерах Вильсона для исследования атомных частиц). Известно также, что если поместить воду между пластинами электрического конденсатора, то его емкость, т. е. способность накапливать электрический заряд от присоединенной к нему батареи, увеличивается в 81 раз. Это происходит потому, что поляризованные молекулы воды поворачиваются в электрическом поле, частично компенсируя его своим собственным полем. При растворении соли в воде молекулы последней помогают образованию ионов, скапливаясь вокруг них таким образом, что к иону направлены заряды противоположного ему знака. Каждый ион собирает вокруг себя целую гроздь молекул воды, которая тащится за ионом, сильно затрудняя его движение. Вот почему ионы так медленно перемещаются в электрическом поле.

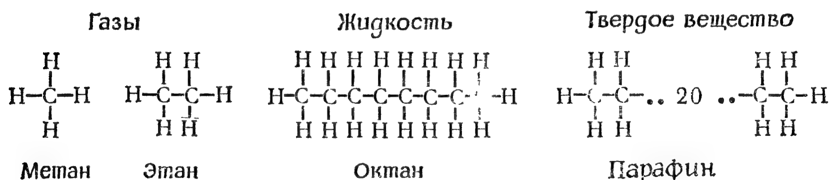
Как увидеть движение ионов

Ионы, так же как и атомы, столь малы, что разглядеть их невозможно, но мы можем увидеть, как они движутся в электрическом поле, по изменению окраски раствора. Поместим немного голубых ионов Cu^{++} или желтых хромат-ионов в раствор с бесцветными ионами (чтобы приостановить перемешивание из-за конвекции, добавим немного желатина, который, однако, не мешает электрическому току и движению ионов). Когда мы наложим электрическое поле, то окрашенное пятно начинает очень медленно перемещаться — со скоростью около миллиметра в минуту. Здесь мы воочию наблюдаем движение настоящих ионов — сгустков заряженных атомов.

ОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Химия углерода. Органические соединения

Углерод, обладающий валентностью 4, обнаруживает замечательную способность соединяться с элементами, расположенными по обе стороны среднего столбца периодической системы, где он помещается, и даже со своими собственными братьями — другими атомами углерода. Он соединяется с водородом, образуя метан CH_4, с хлором, образуя CCl_4, а также с кислородом, азотом, серой и т. д. Легко образуются целые цепочки углеродных атомов, присоединивших водород. Так, из метана получаются этан (газ), ... октан (жидкость, входящая в состав бензина), ... и еще более длинные цепочки, отвечающие твердым веществам (например, парафин).

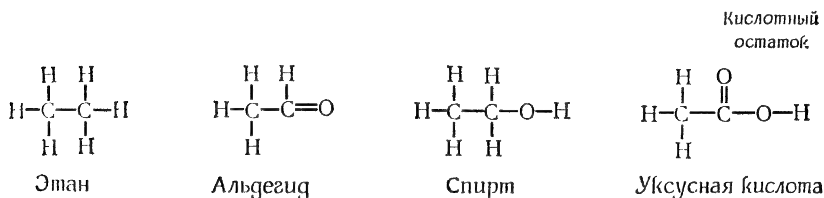


Фиг. 170.

Формулы этих соединений, подобные изображенным на фиг. 172, называются структурными формулами. Они очень полезны для понимания химических свойств сложных органических веществ.

В частности, эти формулы позволяют понять, почему мы часто встречаемся с химическими соединениями, обладающими одинаковым количеством атомов С, Н и т. д., но различными химическими свойствами. Они даже дают нам способы различить, с какой разновидностью мы имеем дело в данном образце. Во многих органических веществах водород, входящий в состав углеводородной цепочки, может замещаться хлором. Возможно и образование боковой цепочки при замещении одного атома водорода атомом углерода, входящим в эту цепочку. Кроме того, соседние углеродные атомы могут соединяться, используя не одну, а две или три связи, как, например, в ацетилене H—C≡C—H.

Если в состав соединения входит кислород, то, обладая валентностью 2, он забирает у углерода две связи. Атом кислорода также может встать в цепочку между углеродом и водородом. Так, при замене в этане крайнего атома водорода радикалом —O—H получается спирт CH_3CH_2OH, формула которого напоминает щелочь, но который не обладает щелочными свойствами.



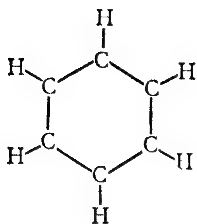
Фиг. 171.

Если вместо двух атомов водорода ввести в спирт еще один атом кислорода, удерживаемый двумя связями, то мы получим уксусную кислоту с характерным для всех органических кислот кислотным остатком COOH.

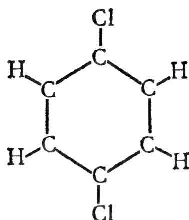
Атомам углерода удобно соединиться в кольцо, которое обычно содержит шесть атомов в виде симметричного шестиугольника, как, например, в бензоле C_6H_6.

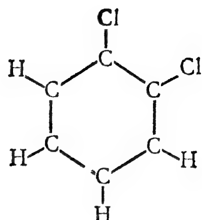
(На фиг. 172, *а* каждый атом углерода одной связью соединен с атомом водорода и две связи использует для того, чтобы образовать кольцо. Если вам покажется, что четвертая связь осталась без дела, вы можете либо употребить ее, чередуя в кольце одиночные и двойные связи, либо считать это дефектом плоской модели.) Существование углеродного кольца, содержащего 6 атомов, убедительно подтверждается опытами по замещению водорода в бен-

золе другими атомами. Если вы поверите в то, что структурная формула бензола действительно представляет собой кольцо, то это поможет вам ответить на вопросы, подобные следующим.



а. Бензол





б. Два дихлорбензола

Фиг. 172.

Задача

Обрабатывая бензол хлором, можно получить хлорбензол C_6H_5Cl, *дихлорбензол* $C_6H_4Cl_2$ *и трихлорбензол. Можно выделить эти три различных вещества и выбрать из них то, анализ которого показывает, что оно является дихлорбензолом. В этом соединении 2 атома водорода замещены хлором, однако его химические и физические свойства существенно зависят от расположения атомов хлора в кольце. На фиг. 172, б показаны два различных расположения, одно из которых симметрично, а другое существенно асимметрично.*

В действительности известно несколько различных дихлорбензолов. Один из них — парадихлорбензол продается как средство против моли.

а) Сколько, по вашему мнению, существует различных дихлорбензолов?

б) Химики могут поверить вашему предсказанию и даже установить, который *из возможных дихлорбензолов имеется в чистом образце, поступив следующим образом. Сначала обработают его хлором, чтобы превратить в трихлорбензол. Затем узнают, сколько различных трихлорбензолов имеется в конечном продукте.* Нарисуйте структурные формулы для каждого из дихлорбензолов, которые вы нашли, решая задачу а). Укажите, сколько различных трихлорбензолов вы ожидаете получить при добавлении к каждому из полученных дихлорбензолов по одному атому хлора.

Органическая и неорганическая химия

Многие из описываемых соединений углерода найдены в живой материи, а наиболее сложные из них были получены только из растений и организмов животных. Поэтому раздел химии, который изучает эти вещества, был назван *органической* химией. Сейчас мы знаем, что углерод способен образовать бесчисленное множест-

во соединений, многие из которых оказались очень полезными, и за всеми ними мы сохраняем это название. Органическая химия не менее важна и разнообразна, чем химия других соединений, которую мы называем *неорганической*.

Современная органическая химия далеко ушла от таких простых веществ, как спирт, уксусная кислота и т. п. Она занимается анализом и синтезом, раскрывает формулы соединений и создает их в лаборатории. Она дает нам растворители, красители, мыло, пластмассы, лекарства и другие полезные вещества с молекулярным весом, достигающим сотен и даже тысяч. Ученые видят успехи органической химии не только в обилии полученных ею соединений, но также в блестящем подтверждении логики ее аргументации, которая скрывается за проделанной работой. Сейчас органическая химия занимается белками пищи и живой материи с молекулярным весом, доходящим до 35 000. Состав этих белков уже известен, так что можно написать для них общую формулу, но работа по разгадке архитектуры их структурных формул еще продолжается.

ЧАСТЬ ПЯТАЯ

АТОМЫ И ЯДРА

«Атомная физика», физика нашего столетия,— сложная наука. Здесь знания накапливаются сразу в нескольких различных направлениях исследований, каждое из которых критикует другие и помогает им. Не существует поэтому логической последовательности глав, А, Б, В... которая бы просто и последовательно изложила историю развития знания или позволила обо всем сразу получить ясное представление. Глава В требует предварительного разъяснения в главе А, но в то же время и сама проливает свет на некоторые вопросы, не получившие объяснения в главе А; некоторые из этих проблем потребуется еще раз осветить в главах Г и Д. Мораль: прочитайте этот раздел дважды — при втором прочтении вы увидите в нем больше смысла.

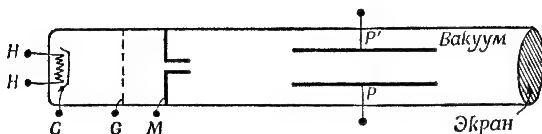
Вздумай автор упомянуть все важные вопросы, ему пришлось бы заполнить эту часть книги информацией, не получившей объяснения, и она стала бы похожей на коллекцию марок. Чтобы не подрывать таким образом репутацию науки, мы предпочли выбрать лишь некоторые темы для тщательной проработки с тем, чтобы читатель уяснил основные представления изучаемой области знаний. Поступая так, некоторые важные проблемы мы рассмотрим достаточно полно, в определенных случаях подходя к рубежам современной науки, и тогда читатель сам сможет исследовать другие области путем самостоятельного чтения книг, уже написанных, и тех, которые будут написаны в будущем.

Вводные задачи к главе 36

Задача 1. Простейшая электронная пушка

Электронная пушка — это устройство для создания пучка электронов (обычно быстродвижущихся). Эти электроны, которые, как мы предполагаем, все одинаковы, очень малы (масса 1/1840 массы атома водорода) и отрицательно заряжены ($-1{,}6 \cdot 10^{-19}$ кулон); их можно затем использовать для получения телевизионных изображений и графиков на экранах осциллографов, для бомбардировки мишеней при проведении атомных исследований и т. д. В этой задаче обсуждается устройство таких пушек. Источники тока, недостающие на схеме, добавьте сами (см. задачи к гл. 32 и 33).

Электронная пушка состоит из источника электронов, которым является горячий катод C, накаляемый подогревателем HH, диафрагмы M, через которую электроны вылетают. Кроме того, во многих случаях добавляются управляющие пластины или сетка G (фиг. 1).



Фиг. 1. К задаче 1.

а) Катод необходимо нагреть, чтобы с него начали испаряться электроны в достаточном количестве.

б) Чтобы на выходе из пушки двигаться достаточно быстро, электроны должны быть ускорены большой разностью потенциалов. Она обеспечивается батареей (или эквивалентным ей источником), которая создает электрическое поле, направленное вдоль пучка, чтобы ускорить электроны на пути от катода к выходному отверстию в диафрагме.

в) Когда такой стремительный поток несется от катода к диафрагме пушки, то ее конструкция перегревается за счет выделения тепла при потере кинетической энергии многочисленными электронами, которые останавливаются и поглощаются стенками, не сумев проскочить в выходное отверстие. Чтобы избежать этого, между C и G прикладывается небольшое тормозящее поле. Тогда лишь небольшая часть потока проникает дальше G и затем ускоряется.

г) Для «отклонения» электронного пучка вверх или вниз между пластинами P и P' прикладывается вертикальное электрическое поле.

Все эти электрические поля можно создавать, подключая в соответствующих точках источники нужного напряжения.

Перечертите эскиз, добавив батареи *во всех местах, где они требуются, учитывая следующие, достаточно типичные требования:*

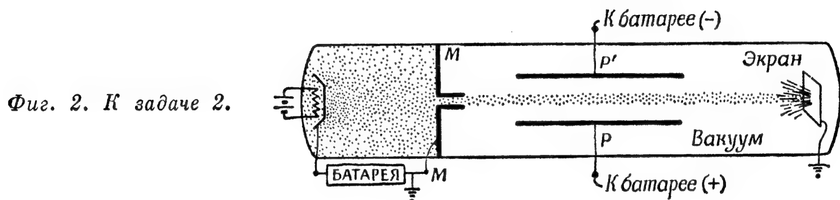
а) спиралька, подогревающая катод, потребляет 5 а и имеет сопротивление 2 ом;

б) для ослабления потока лучше использовать напряжение 12 в;
в) разгон потока до необходимой скорости требует напряжения порядка 2000 в;
г) для системы отклонения пучка между пластинами P и P′ нужно приложить 40 в, если расстояние между ними 0,02 м.

Не забудьте убедиться, что полюса батарей подключены с учетом того факта, что электроны заряжены отрицательно (поставьте на полюсах + и —). *Поле между P и P′ должно отклонять электроны* вверх.

Задача 2. Отклонение пучка

Пучок электронов выходит из электронной пушки и движется вдоль длинной трубки. Пластины P и P′, соединенные с батареей, как показано на фиг. 2, создают электрическое поле.



Фиг. 2. К задаче 2.

а) По какому пути полетят электроны, покинув пушку, если между пластинами P и P′ не будет включено поле?
б) Как будет меняться скорость электронов, продолжающих движение вдоль трубки, если разность потенциалов между P и P′ отсутствует?
в) Назовите общий физический закон, который подводит итог наблюдениям над определенными природными явлениями, а выводы из него используются для предсказания других аналогичных явлений и на который вы опирались, отвечая на вопросы а) и б).
г) Пусть теперь напряжение на пластины P и P′ подано; тогда между ними существует сильное однородное, вертикально направленное поле, а за пределами области, ограниченной пластинами, это поле пренебрежимо мало. На что будет похожа траектория пучка в сильном поле? (У этой траектории есть определенное название, приведите его, а также нарисуйте траекторию.)
д) Где вы встречали ситуацию, когда тело движется по подобному пути в однородном силовом поле?
е) Когда пучок покидает область между пластинами P и P′, где имеется поле, он подвергается действию пренебрежимо слабого поля. Опишите траекторию пучка на этом участке и покажите ее на вашем эскизе.

ГЛАВА 36 • ЭЛЕКТРОНЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

...за его работы по изучению элементарного электрического заряда и фотоэлектрических явлений...

(Из решения о присуждении Нобелевской премии по физике за 1923 г. Р. А. Милликену)

...за его открытия в физической науке.

(Из решения о присуждении медали Копли, высшей награды Королевского Общества [1], Дж. Дж. Томсону)

Исследование атомных частиц

Мы знаем, что электроны, испаряющиеся из раскаленной спиральки, несут отрицательный заряд; но как измерить заряды отдельных электронов и их массы и показать, что все они одинаковы? Как измерить их скорость при вылете из электронной пушки? И потом говорят, что электроны, оторванные от молекул разреженного газа в электрической разрядной трубке,— это те самые универсальные частицы, из которых состоит материя. Как доказать, что они именно таковы? Как можно показать, что они гораздо меньше, чем атомы? Как проникнуть в атомную структуру, исследуя положительные ионы — то, что осталось от атомов в разрядной трубке? Как регистрировать ядерные снаряды (альфа- и бета-частицы), которыми стреляют радиоактивные атомы?

Электроны, ионы, ядра... Это некоторые из крошечных *частиц*, изучаемых современной физикой; мы описываем их индивидуальные особенности, определяя их заряд, массу, скорость... Их нужно ловить на лету. Остановившись, они затеряются среди атомов стенок приборов, проводов и т. д.[2] Поэтому нужную информацию мы добываем, отклоняя их от первоначального направления с помощью полей — точно так же, как можно оценить скорость мячика по тому, как влияет на его полет поле тяготения. Гравитационные поля слишком слабы для изучения атомных частиц. Конечно,

[1] Королевское Общество — название Академии Наук в Англии.— *Прим. перев.*

[2] Если только они не радиоактивны (тут заложены изумительные возможности).

все эти частицы, когда летят, подвергаются действию силы тяжести, но при любом разумно выбранном напряжении электронной пушки они движутся слишком быстро, для того чтобы их падение можно было заметить на тех расстояниях, которые им обычно приходится пролетать. (Альфа-частица, испущенная радием, пролетев километр, сдвинулась бы под действием тяготения за это время на несколько миллионных долей сантиметра, а электроны в телевизионной трубке на таком же пути — на десятимиллионную долю сантиметра, если бы у нас была трубка в километр длиной.) Поэтому мы заставляем действовать на электрический заряд, который несут эти частицы, электрическое и магнитное поля.

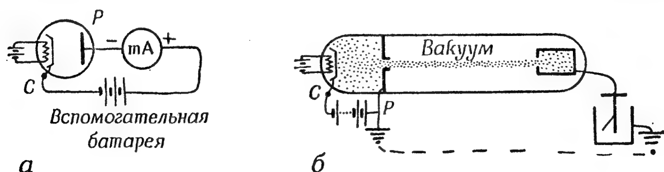
В этой главе мы покажем, что́ можно сделать с помощью *электрических* полей, а в следующей главе вернемся к магнитным полям и увидим, как, объединяя действия полей обоих типов, определить скорость частицы и ее существенную опознавательную характеристику: отношение заряда к массе, e/m.

Поля и пучки

Электрическое поле к электронам мы уже прикладывали. В трубке осциллографа напряжение в электронной пушке создает поле, направленное вдоль пучка электронов, чтобы разогнать их, а отклоняющие поля качают пучок вверх-вниз и из стороны в сторону. В разрядной трубке электрическое поле, направленное *вдоль* нее, ведет положительные ионы в одну сторону, а электроны и отрицательные ионы — в противоположную, создавая толчею возбужденных атомов, которые испускают свет, когда их электроны возвращаются в состояния с наименьшей энергией.

Пучок из электронной пушки

Пучок частиц, испускаемых горячим катодом и ускоряемых напряжением электронной пушки, несет отрицательный заряд. В этом можно убедиться, включив последовательно с вакуумным



Фиг. 3. Пучок частиц несет отрицательный заряд.

диодом миллиамперметр или поймав пучок в маленькую металлическую чашечку, соединенную с электроскопом. Чтобы показать, что все «снаряды» в этом пучке одинаковы и что они суть электроны, мы должны провести измерения, используя отклоняющие поля. В задачах к настоящей главе предлагаются данные, типичные для реальных экспериментов. Чтобы понять, как можно исследовать электроны, решите эти задачи.

Задача 3. Прямое измерение скорости электрона

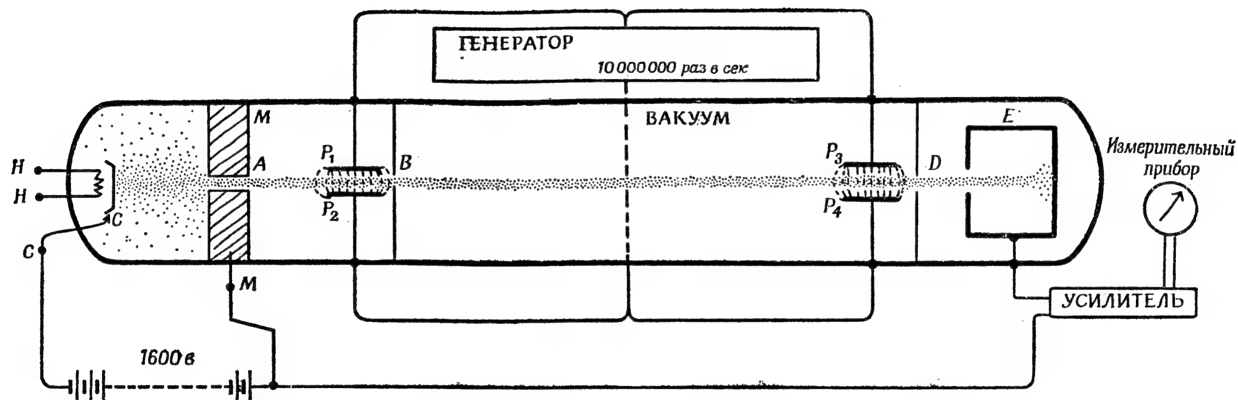
В задаче демонстрируется метод, который был использован для измерения скорости электронов в пучке, вылетающем из электронной пушки. Мы применяем колебательный контур для создания отклоняющего электрического поля, действующего на пучок[1]. *Имея такой контур, можно попеременно подавать на пару металлических пластин положительные и отрицательные заряды с частотой, скажем, 10 000 000 раз в секунду. Тогда и электрическое поле в пространстве между пластинами будет менять свое направление* — вверх, вниз, *снова* вверх, *снова* вниз, *с той же частотой: тоже 10 000 000 раз каждую секунду.*

Располагая современными насосами, легко получить в длинной трубке такой хороший вакуум, что электрон проделает весь свой путь без столкновений. На фиг. 4 показана такая трубка с электронной пушкой у одного конца. Поток электронов, испущенных раскаленным катодом C и ускоренных напряжением пушки (которое составляет, скажем, 1600 в в промежутке между точками C и M), выходит через небольшое отверстие A в диафрагме пушки M и продолжает лететь вдоль трубки, больше не меняя скорости. Пара горизонтальных пластин P_1 и P_2 помещается за отверстием A, так что пучок электронов проходит через вертикально направленное электрическое поле между пластинами. Как раз за пластинами расположена перегородка с отверстием B. Если переменное электрическое поле, описанное выше, приложено к области между P_1 и P_2, оно будет раскачивать электронный пучок вверх и вниз, так что электроны будут проникать через отверстие B маленькими порциями, один раз по пути вверх, другой раз по пути вниз (ДВАЖДЫ ЗА ЦИКЛ), *как струя из пожарного шланга, если ею водить по забору с дыркой. Эти порции будут лететь вдоль трубки с постоянной скоростью v. На этом пути они пролетают между другой парой пластин P_3 и P_4, к которым прикладывается то же самое переменное электрическое поле, синхронное с полем между пластинами P_1 и P_2. Вслед за этой парой пластин стоит вторая диафрагма с отверстием D. За этим отверстием расположен коллектор E, собирающий электроны и соединенный с усилителем и счетчиком, который регистрирует электронные сгустки, достигающие E. Отверстия A, B и D располагаются на одной прямой между C и E.*

ДАННЫЕ. *Отверстия B и D расположены на расстоянии 1,20 м друг от друга. Из независимых измерений известно, что колебательный контур, соединенный с обеими парами пластин, имеет частоту 10 000 000 колебаний в се-*

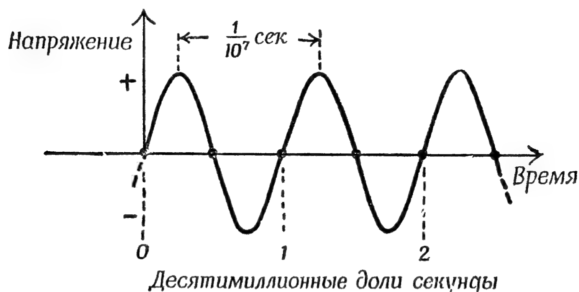
---

[1] В подлинном эксперименте вместо электрического поля было использовано переменное **магнитное.**



Фиг. 4. К задаче 3. Измерение скорости электронов.

кунду. Если напряжение между катодом электронной пушки C и ее диафрагмой равно 1600 в, то, как это обнаружено в эксперименте, действительно имевшем место, через отверстие D на коллектор попадает много электронов. Если напряжение пушки составляет 1500 или 1700 в, то электронов мало. Заметьте, что путь, проходимый электронами в отклоняющем поле пластин, очень короток, так что электроны пролетают через поле быстро — за малую долю периода колебательного контура.



Фиг. 5. Напряжение, подаваемое генератором, описанным в условии задачи 3.

а) Укажите причину, по которой электроны не долетают до E, если только пушка не заставляет их двигаться со строго определенной скоростью (т. е. со скоростью, соответствующей напряжению 1600 в, а не 1500 или 1700 в).

б) Оцените на основании вышеприведенных данных скорость электронов. (Сделайте простейшие предположения из всех возможных. Они приведут к тому, что ваша оценка даст максимальную *скорость.)*

в) Объясните, почему и некоторые другие скорости могут согласоваться с описанными наблюдаемыми фактами.

г) Рассчитайте одну или несколько таких скоростей.

д) Как бы вы попробовали выяснить (перестраивая аппаратуру), какой выбор решения, б) или г), правилен? (Эта задача требует как здравого смысла, так и тщательных размышлений.)

Задача 4. Как оценить отношение заряда к массе по напряжению на электронной пушке и скорости электрона

Поток электронов выбрасывается из электронной пушки, расположенной в конце длинной трубки. Пусть скорость их измерена (см. предыдущую задачу) и равна v. Батарея дает напряжение V между точками C и M, которое разгоняет электроны от первоначального состояния покоя до конечной скорости v, с которой они и вылетают из пушки. Каждый электрон, несущий заряд в e кулонов, проходит разность потенциалов V в, приложенную к пушке, набирая кинетическую энергию. Если вакуум хороший, то вся энергия, которую батарея передает электрону с помощью электрического поля пушки, переходит в его кинетическую энергию. Эксперименты показывают, что:

если напряжение, приложенное к пушке, составляет 100 в, то электроны вылетают со скоростью v, которая в результате измерения оказалась равной 6 000 000 м/сек

(ЭТО НЕ ОПЕЧАТКА)

Используйте эти данные для оценки массы одного электрона *по следующему рецепту:*

а) Обозначьте массу электрона в кг через m. Запишите кинетическую энергию, с которой он движется вдоль трубки, выразив ее через m. (Запишите и единицы измерения.)

б) Обозначьте заряд в кулонах через e. Какую энергию он приобрел, пройдя через 100-вольтовую разность потенциалов электронной пушки? Выразите ее через e. (Опять не забудьте про единицы.)

в) Проследите, чтобы ответы на пункты а) и б) были выражены в одних и тех же единицах. Запишите уравнение, отражающее тот факт, что энергия, переданная электрону 100-вольтовой батареей, как раз и есть *его кинетическая энергия. Решите его и найдите отношение* заряда к массе *для электрона, т. е. e/m.*

г) В другом, совершенно особом опыте Милликен обнаружил, что заряд *электрона e равен $-1{,}60 \cdot 10^{-19}$ кулон. Если так, то чему равно значение* массы *электрона в кг?*

Все электроны одинаковы

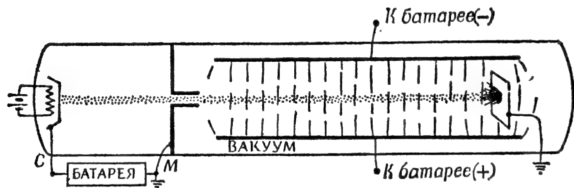
Прямое измерение v неудобно, за исключением случая достаточно медленных электронов; но кто бы ни делал измерения, описанные в задачах 3 и 4, из сопоставления их результатов всегда получалось одно и то же значение e/m, какую бы скорость электронов ни брали, какое бы напряжение ни прикладывали к электронной пушке. Из какого материала ни сделай пушку, значение e/m все равно получается одним и тем же: все электроны имеют одинаковое отношение заряда к массе. Этот вывод о том, что электроны едины, универсальны, был получен в результате исследований, выполненных в начале нашего столетия. Однородных пучков, создаваемых пушками с известным напряжением, тогда не было, и приходилось выполнять более сложные измерения, используя электрическое поле, чтобы отклонять электроны, а затем еще магнитное поле. С тех пор отклонения пучков в разных направлениях электрическими и магнитными полями постоянно используются в фундаментальных экспериментах атомной физики. В задаче 5 показано, как можно использовать поперечное электрическое поле.

Можно сопоставить отношение e/m с результатами других опытов, чтобы получить очень важную информацию об атомах; но и сами по себе измерения e/m позволяют высказать два утверждения огромного значения:

1) Отношение e/m имеет одну и ту же величину для всех электронов, от самых медленных до довольно быстрых, из какого бы источника они ни вылетали. Их можно испарять из раскаленной нити, выбивать из атомов металла светом (как в фотоэлементе), срывать с атомов рентгеновскими лучами, радиоактивные атомы могут выстреливать их в виде бета-частиц— результат будет тот же самый, что и при первоначальном способе выбивания их из атомов при соударениях в разрядной трубке. Это означает, что *электроны все одинаковы*, *что электрон — универсальная составная часть материи.*
2) Если производить опыты с *очень быстрыми* электронами, величина e/m оказывается меньше стандартной. Это означает, что если заряд e остается постоянным, то *масса при высоких скоростях становится больше* — в полном согласии с теорией относительности.

Задача 5. Отклонение пучка электронов электрическим полем

Одним из первых экспериментальных способов исследования катодных лучей была посылка пучка через электрическое поле (см. выше вводную задачу 2). Отношение заряда к массе *для частиц в пучке можно определить также, измеряя вместо напряжения на трубке отклонение пучка.*



Фиг. 6.

Задача покажет вам, как рассчитать e/m по результатам таких измерений. Предположим, что пучок электронов вылетает из пушки со скоростью $2{,}4 \cdot 10^7$ м/сек, т. е. 24 000 000 м в секунду (как определить эту скорость, сказано в задаче 3). Этот пучок пропускается через протяженную область, поперек которой приложено электрическое поле (фиг. 6). В конце своего пути пучок попадает на флуоресцирующий экран, так и не успев выйти за пределы области, пронизанной полем.

Приводимые ниже данные вполне могут быть получены в реальном опыте. Представьте себе, что так оно и есть, что попытка измерить отношение e/m для электрона предпринята, и рассчитайте e/m (в кулонах на килограмм).

Скорость частиц в пучке (см. задачу 3) $2{,}4 \cdot 10^7$ м/сек.
Отклонение пучка в приложенном поле 0,015 м вниз по вертикали.
Расстояние между пластинами, создающими поле . . . . 0,050 м.

Длина области, в которой действует поле . . . . 0,20 м.
Разность потенциалов между пластинами . . . . 120 в.
(Обратите внимание, что напряжение на пушке не задается, поскольку знать его не нужно.)

Рассчитайте:

а) Напряженность электрического поля *между пластинами, т. е. силу, в ньютонах, действующую на один кулон.*
б) Силу, *действующую со стороны поля на заряд е, т. е. на один электрон.*
в) Ускорение *электрона. Обозначьте его массу в килограммах через т.*
г) Время, *которое потребуется электрону, чтобы пересечь область 0,20 м, где имеется поле. (Примечание. 0,20 м — длина области* по горизонтали, *и скорость, названная выше,— тоже* горизонтальная. *Влияет ли как-нибудь вертикальная скорость, приобретаемая электронами? Относительно независимости движений проконсультируйтесь у Галилея.)*
д) Затем рассчитайте расстояние s, которое электрон проходит по вертикали под действием поля. Для этого заметьте, что электрон попадает в поле с нулевой скоростью по вертикали и движется с ускорением, рассчитанным в пункте в), в течение времени, рассчитанного в пункте г). (В результате должна получиться формула для s, в которую войдут величины 0,20 м, заряд е, масса т и т. д.)
е) Отношение е/т. Как сказано выше, результаты измерения дают расстояние, равное 0,015 м. Напишите уравнение, показывающее, что отклонение, рассчитанное в пункте д), в самом деле 0,015 м. Решите это уравнение для е/т.

В этой задаче вам заранее была известна скорость, которая могла быть измерена методом приложения переменного электрического поля, изложенным в задаче 3. Пока вы ее не знаете, она входит в тот набор неизвестных, которые в виде комбинации e/mv^2 *можно рассчитать по отклонению в электрическом поле. В большинстве опытов с катодными лучами скорость неизвестна, пока не выполнены измерения с отклоняющим магнитным полем.*

Задача 6. Сравнение атомов с электронами

Разговор сейчас пойдет об ионах, которые позволяют растворам проводить электрический ток. Химические данные давно указывали на то, что переносчики электричества — это отдельные атомы, а иногда группы атомов, несущих заряды, причем заряды одинаковые. Каждый равнялся крошечной универсальной «атомной единице» электричества (которая была названа *«электроном» задолго до того, как были открыты* настоящие *электроны). В некоторых случаях заряды равнялись 2 или 3 таким единицам. В начале нынешнего столетия при изучении диффузии ионов были получены опытные данные, указывающие на то, что основная единица заряда ионов химических соединений по величине совпадает с зарядом, который несут летящие электроны и который был измерен Дж. Дж. Томсоном. Итак, определяя отношение* заряда к массе *у продуктов электролиза, мы выполняем измерения, которые, вероятно,* с сохранением тех же самых пропорций *можно было бы выполнить и над отдельными атомами. Сравнивая это отношение* заряда к массе *с тем, которое получено для электронов в пучке электронной пушки, мы можем, следовательно, сравнить атомы с электронами. Таким образом, отношение* заряда к массе

для ионов содержит важную для атомной физики информацию. А как измерить это отношение, покажут приведенные ниже вопросы.

Данные. *Когда ток проходит через воду, содержащую кислоту, с металлических пластин (электродов), по которым приходит и уходит ток, срываются пузырьки кислорода и водорода (кислота в этом случае лишь посредник, поставляющий ионы).*

Опыт показывает, что при пропускании тока в 10 а в течение 1000 сек выделится 0,001244 кубометра газообразного водорода (при комнатной температуре и давлении в 1 атм).

Если в одной и той же теплой комнате взвешивать большой стеклянный шар, наполнив его сначала водородом при атмосферном давлении, затем пустой, затем наполнив водой, то весы дадут следующие показания:

Масса шара, наполненного водородом 1,60084 кг
Масса пустого шара . . . . 1,60000 кг
Масса шара, наполненного водой . . около 11,60 кг

а) Используя эти данные, рассчитайте плотность водорода в кг/м³.
б) Чему равна масса *водорода, выделившегося при «электролизе» в опыте, описанном выше?*
в) Чему равен электрический заряд *(=количеству электричества), прошедший через аппарат?*
г) Весь заряд, притекающий на пластину, где выделяются пузырьки водорода, переносится, скорее всего, этим самым водородом. Если это так, то чему равно отношение заряд/масса *для* полного заряда, *перенесенного* полной массой *водорода?*
д) Предположим, *что все «водородные носители» совершенно одинаковы и являются не чем иным, как атомами водорода. Чему равно e/M, отношение* заряда к массе, для иона атома водорода?
е) Опыты с электронными пучками показывают, что для электрона e/m составляет около $1{,}8 \cdot 10^{11}$ кулон/кг. (Это означает, что 1 кг электронов имел бы заряд в 180 000 000 000 кулон.) Сравните значения e/M для иона водородного атома и e/m для электрона, вычислив отношение этих значений.
ж) Полагая, что e в обоих случаях одинаково, сравните m и M.

Значения *e/m*

Измеряя отклонение в электрическом поле, можно вычислить отношение e/mv^2. Напряжение на электродах пушки *также* дает нам e/mv^2. Так что, если мы знаем это напряжение, то отклонение пучка в электрическом поле не дает нам никакой новой информации[1]. Чтобы вычислить отношение e/m — важнейшую характе-

[1] Это разочарование закономерно; ведь, подавая напряжение на пушку, мы прикладываем к электронам электрическое поле, ускоряющее их вдоль направления их пути. Не следует ожидать получения разной информации в двух случаях, когда используется одно и то же средство — *электрическое* поле.

ристику заряженных атомных частиц, мы должны либо непосредственно определить v, либо измерить отклонение частиц в магнитном поле (см. гл. 37), которое даст отношение e/mv. Пока предположим, что мы *можем* исключить v и найти значение e/m.

Сто лет назад электроны как таковые не были известны. Единственным указанием на существование «атомов электричества» были данные электролиза, веско свидетельствовавшие в пользу того, что каждый атомный ион несет стандартный электрический заряд, имеющий одну величину для всех ионов химических соединений, за исключением лишь отдельных случаев, когда эта величина удваивалась или утраивалась. Пятьдесят лет назад были получены электронные пучки, с которыми производились самые разнообразные опыты. Дж. Дж. Томсон выполнил первые последовательные, хотя и грубые измерения зарядов и масс электронов и положительных ионов; их-то он и считал основными компонентами атомной структуры. Некоторые результаты измерений e/m и e/M приведены в таблице на стр. 274.

Если не считать изменений, происходящих при очень высоких энергиях, все электроны имеют одно и то же отношение e/m, $1,76 \cdot 10^{11}$ *кулон/кг*. Сравните это с отношением e/M для самого легкого из ионов, H^+. Такие ионы переносят 96 500 000 *кулон* на каждые 1,008 *кг* водорода, выделяющегося при электролизе. Так что для H^+ $e/M = 9{,}57 \cdot 10^7$ *кулон/кг*. Для электронов отношение e/m почти в две тысячи раз больше. Тогда, если e одинаково у обеих частиц, значение *m у электронов должно быть почти в две тысячи раз меньше.* [Несколько раньше с помощью изобретательно поставленных опытов и логических рассуждений было показано, что прозведение $N \cdot e$ одинаково для ионов в газах и ионов, образующихся при электролизе (N—число Авогадро). Ни N, ни e не были известны, а произведение $N \cdot e$ оказалось возможным оценить: с одной стороны, существовали измерения «валового выхода» при электролизе, тех самых 95 700 000 *кулон*, переносимых килограммом водородных ионов, с другой стороны, хитроумные опыты с ионами газов с использованием явления диффузии. После их выполнения рассудили, что в случае ионов газов e — это заряд выбитого электрона, а N — одно и то же как для ионов, так и для электронов; следовательно, и e одно и то же.] Так впервые было показано, что электроны — это крошечные осколки атомов[1].

---

[1] Открытие это созрело в конце прошлого столетия, но Дж. Дж. Томсон выполнил первые четкие измерения e/m, и в этом смысле мы говорим, что он «открыл электрон».

Таблица значений e/m и e/M

(Самые первые измерения были недостаточно точны. В таблице приведены данные, полученные уже тогда, когда были разработаны хорошие экспериментальные методики; численные результаты обычно рассчитывались по отклонениям частиц в электрическом и магнитном полях.)

Частицы		Значение e/M и e/m, *кулон/кг*
Катодные лучи в разрядной трубке: электроны, выбитые из атомов газа или металлического электрода с помощью бомбардировки. [Поскольку это был самый первый метод получения электронных пучков (благодаря нему за ними и закрепилось название катодных лучей), приводятся результаты трех различных экспериментов.]		$1{,}775 \cdot 10^{11}$ $1{,}761 \cdot 10^{11}$ $1{,}759 \cdot 10^{11}$
Электроны, вылетающие из вольфрамовой спиральки, накаленной добела (как в диоде)		$1{,}76 \cdot 10^{11}$
Электроны с раскаленного докрасна оксидного катода (какие применяются в современных радиолампах)		$1{,}78 \cdot 10^{11}$
Электроны, выбитые из металла ультрафиолетовым светом («фотоэлектрический эффект», используемый в фотоэлементах)		$1{,}756 \cdot 10^{11}$
Внутриатомные электроны, вынуждаемые внешним магнитным полем к изменению своих «орбит» (эффект Зеемана)		$1{,}761 \cdot 10^{11}$
Электроны в водородных и гелиевых атомах: использован метод сравнения электронной массы с массой атома по измерениям длин волн в спектрах, трактуемых теорией Бора, которая считается верной		$1{,}761 \cdot 10^{11}$
Медленные бета-частицы, испускаемые радиоактивными атомами		$1{,}763 \cdot 10^{11}$
Бета-частицы (медленные . . . умеренно быстрые . . . быстрые), испускаемые радиоактивными атомами; получается непрерывный набор значений		от $1{,}76 \cdot 10^{11}$ до $0{,}35 \cdot 10^{11}$
В более поздних экспериментах, когда электроны, испускаемые горячими катодами, стали разгонять до огромных энергий на ускорителях, нижняя граница интервала получаемых значений e/m опустилась; получены величины, в тысячи раз меньшие — это изменение связывается с релятивистским увеличением массы		
Положительно заряженные лучи: положительные ионы в разрядных трубках. Значение e/M зависит от того, какой газ наполняет трубку:		
ион водорода	H^+	$\frac{1{,}76 \cdot 10^{11}}{1840}$

Частицы		Значение e/M, *кулон/кг*
ион кислорода	O^{+}	$\frac{1{,}76\cdot 10^{11}}{16\cdot 1840}$
ион кислорода	O^{++}	$\frac{1{,}76\cdot 10^{11}\cdot 2}{16\cdot 1840}$
ионы ртути Hg^{+}, Hg^{++} . . . до $Hg^{++++++++}$		$\frac{1{,}76\cdot 10^{11}\cdot(\text{от 1 до 8})}{200\cdot 1840}$
Положительные ионы при электролизе:		
ион водорода	H^{+}	$\frac{1{,}76\cdot 10^{11}}{1840}$
ион меди	Cu^{++}	$\frac{1{,}76\cdot 10^{11}\cdot 2}{63{,}6\cdot 1840}$
ион хлора	Cl^{-}	$\frac{1{,}76\cdot 10^{11}}{35{,}5\cdot 1840}$
Альфа-частицы, испускаемые радиоактивными атомами		$\frac{1{,}76\cdot 10^{11}\cdot 2}{4\cdot 1840}$
И многие недавно открытые частицы (например, μ-мезоны)		$\frac{1{,}76\cdot 10^{11}}{\sim 200}$

Вычислим дроби более точно:

$$\frac{m}{M}=\frac{e/M}{e/m}=\frac{9{,}75\cdot 10^{7}}{1{,}76\cdot 10^{11}}=\frac{1}{1840}.$$

Электрон и атом, его потерявший (т. е. оставшийся от атома положительный ион), имеют равные и противоположные по знаку заряды, поскольку вещество обычно нейтрально. Но массы их чрезвычайно сильно отличаются. Не удивительно, что электроны так подвижны в электрических полях: легко отклоняемый пучок электроны образуют в телевизионной трубке, мгновенно, как охваченная паникой толпа, срываются с места в счетчике Гейгера. При таком большом в сравнении со своей маленькой массой заряде они ускоряются в электрических полях много быстрее, чем заряженные атомы. Лишь когда электроны приобретают огромные кинетические энергии, миллиарды электронвольт, они кажутся (неподвижным наблюдателям) такими же массивными, как атомы.

Зачем нужно знать *e*

Если мы сможем измерить *e*, то, поделив эту величину на определенное ранее отношение e/m, найдем массу отдельного электрона. А массу отдельного *атома* с его помощью узнать еще проще, поскольку e/M для атомных ионов легко определяется из опытов по электролизу. По атомным массам можно рассчитать массу любой молекулы, а следовательно, число молекул в любом образце жидкости или газа. Кроме того, теории атомной структуры не обходятся без вычислений, для которых необходимо знать истинную величину *e*. Точное знание этой величины имеет чрезвычайно важное значение.

Измерение *e*

К 1900 г. существование электрона как атомной частицы было установлено и определено отношение e/m для него, но о величине *e* можно было строить лишь приблизительные догадки. Экспериментальные факты по электролизу задолго до этого указывали на то, что существуют «атомы электричества», во всем подобные друг другу, причем некоторые ионы несут по одному такому атому электрического заряда, другие — по два и т. д. К 1910 г. величина *e* стала крайне необходимой для развития атомных теорий — теорию Бора нельзя было бы как следует проверить, не зная как следует ни *e*, ни e/m. Дж. Дж. Томсон и другие попытались измерить *e*, формируя облачка из мельчайших водяных капелек, каждая из которых образовывалась вокруг иона с зарядом *e*, а затем собирая эти облачка. Это дало лишь грубую оценку, и не было никакой уверенности, что все эти заряды в точности равны [1]. Тогда Р. А. Милликен [2] и поставил свой великий эксперимент, в котором использовал крошечную капельку масла, собиравшую небольшой заряд с ионов воздуха. Он снова и снова измерял полный заряд капельки и каждый раз обнаруживал, что тот в небольшое целое число раз (например, в 1, 2 или 10) больше некоторого основного заряда, который во всех случаях был одним и тем же. Поначалу он не знал ни величины этого универсального основного заряда, «электрона», ни того, сколько таких зарядов помещалось на его

---

[1] Не было доказано и то, что *массы* всех атомов одного химического элемента равны, но это казалось настолько правдоподобным, что ни у кого не вызывало сомнения. Теперь-то мы знаем, что это не так.

[2] Милликен дал превосходное популярное изложение своей работы, сопроводив его убедительными выдержками из своего лабораторного журнала, в книге: Electrons (+and—), University of Chicago Press, 1947.

капельке. Он должен был проводить измерения со многими заряженными каплями, а потом устраивать арифметическую «угадайку». Задача была «похожа на случай, когда вам надо найти вес одного яйца, если даны веса большого числа бумажных кульков с яйцами, в каждом из которых находится свое, к тому же неизвестное число яиц»[1].

Задача 7

а) *Пусть кульки с яйцами весят 12, 16, 28, 24 унции. Попробуйте определить вес яйца и число яиц в каждом кульке.*
б) *Предположим, что вам дали еще один кулек, а он весит 14 унций. Как это отразится на ваших предположениях?*
в) *Добавили еще один кулек, весящий 12,1 унции. К какому заключению вы придете?*

По существу метод, использованный Милликеном и его предшественниками, совпадает с тем, который, как рассказывалось в гл. 33, использовался для измерения заряда металлического шара. Он заключался в измерении силы, действовавшей на шар со стороны однородного электрического поля. Для измерения e несколько электронных зарядов передавалось крошечной капельке жидкости, плавающей (или, точнее, медленно падающей) в воздухе. Капелька помещалась в вертикальное электрическое поле, которое, действуя на заряд капельки, тянуло ее вверх. Единичный заряд электрона e очень мал, и видимая дождевая капля была бы для него слишком тяжела; потребовался бы миллиард или около того электронных зарядов, чтобы в реально возможном поле удержать ее на весу. Поэтому была использована очень маленькая капля из пульверизатора, настолько маленькая, что ее по-настоящему и не видно было — лишь крошечную звездочку рассеянного ею света можно было наблюдать в микроскоп. Такая миниатюрная капелька равномерно опускается в воздухе — трение о воздух компенсирует действие тяготения. Постоянную скорость этого движения вниз можно измерить и использовать для того, чтобы «взвесить капельку». Если включить вертикальное электрическое поле, оно добавит еще одну силу: действие поля на электрический заряд капельки. В первых экспериментах электрическое поле подбиралось так, чтобы не давать капельке падать, так что она парила в воздухе. Однако большей точности удалось добиться, используя более сильное поле и заставляя капельку сперва дви-

[1] Ф. А. Саундерс, из книги: A Survey of Physics, New York, Henry Holt, 1930.

гаться вверх, а потом позволять ей падать в отсутствие поля. Таким образом, измерения можно было повторять, «вздергивая» капельку вверх и позволяя ей падать снова и снова, играя с ней, как кот с мышью. В этом и состояло выполненное Милликеном измерение электронного заряда — великолепный образец экспериментального исследования, которое принесло ему неувядающую славу.

Чтобы понять, как Милликен проводил свои измерения, проработайте приведенную ниже задачу 8. Капелька (чаще масляная, чем водяная) обычно образовывалась со случайным зарядом, полученным за счет трения о стенки трубки пульверизатора, подобно тому, как эбонитовая палочка электризуется о мех. Путешествуя вверх и вниз, она могла случайно изменить свой заряд, встретив ион в окружающем воздухе. Это изменение сразу сообщало ей новую скорость дрейфа вверх в электрическом поле. Иногда Милликен вызывал быстрое изменение заряда, используя рентгеновские лучи для того, чтобы выбить электроны из самой капельки. Он заставлял одну и ту же капельку многократно менять свой заряд, а после этого должен был решать задачу о «яйцах в кульке».

Задача 8. Опыт Милликена по определению заряда электрона

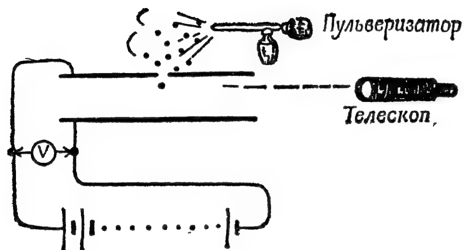
Милликен проводил свой опыт с маленькой масляной каплей, которая получила небольшой заряд от ионов воздуха. Он мог часами экспериментировать с одной и той же каплей, заставляя ее снова и снова подниматься вверх, а затем позволяя ей падать. В отсутствие электрического поля капля падает с постоянной скоростью, характерной для капли данного размера.

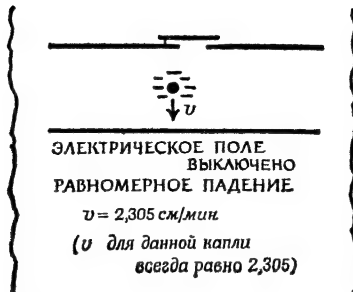
а) *Проводя опыты с масляной капелькой, Милликен обнаружил, что скорость ее падения оставалась постоянной в течение многих часов, сколько бы раз ей ни позволяли падать. Однако с капелькой воды дело обстояло иначе — время ее падения постепенно увеличивалось. К какому выводу вы приходите относительно масляной капельки?*

б) *Во включенном электрическом поле капелька двигалась вверх с постоянной (но в разных опытах различной) скоростью. Эта скорость оставалась постоянной на протяжении многих циклов подъема, а затем вдруг принимала новое значение. Эти внезапные изменения учащались после того, как Милликен включал находившуюся поблизости рентгеновскую трубку. Дайте объяснение этих внезапных изменений.*

Вот некоторые данные измерений, выполненных с одной капелькой, которая многократно падала со скоростью $v=2{,}305$ см/мин (см. сноску на стр. 280). После включения электрического поля она в течение нескольких циклов поднималась со скоростью $u_1=2{,}516$ см/мин. Затем скорость подъема внезапно изменилась и в течение одного или нескольких циклов была равна $u_2=1{,}434$ см/мин, затем опять изменилась до $u_3=0{,}903$ см/мин, затем до 0,369 см/мин, потом опять до 0,903 см/мин и после принимала значения 1,958, 0,903 и 1,434 см/мин.

Как теория, так и эксперимент показывают, что при очень медленном движении шарика через вязкую жидкость (а также и при движении через воз-







Фиг. 7. Опыт Милликена.

дух, если капелька достаточно мала) сила сопротивления, возникающая за счет трения о жидкость, дается выражением

$$F = K \cdot (\text{скорость}),$$

где K — постоянная, зависящая от коэффициента трения жидкости и радиуса шарика, а они не меняются в течение всего эксперимента с капелькой.

Когда капля падает в отсутствие поля, на нее действуют лишь две силы: ее вес $m \cdot 9{,}8$ ньютон и сила трения $K \cdot v$. Разогнавшись вначале, капля падает затем равномерно, без ускорения.

в) Напишите уравнение, показывающее, как эти две силы связаны между собой при равномерном падении. [При написании этого уравнения используйте экспериментальное значение $v = 2{,}305$ см/мин [1]*.]*

г) Предположим, что электрическое поле, когда оно включено, имеет напряженность X ньютон/кулон и действует на заряд капельки, равный Q кулон. С какой силой поле действует на капельку?

д) Когда поле включено, капелька движется вверх со скоростью u (например, 2,516 см/мин), и на нее действует сила трения $K \cdot u$, направленная вниз и препятствующая этому движению. Вес капли $m \cdot 9{,}8$ ньютон — это тоже сила, направленная вниз. Начав движение, капля движется с постоянной скоростью без ускорения. Напишите уравнение, связывающее три *силы, действующие на капельку.*

е) Исключите из последнего выражения вес $m \cdot 9{,}8$ ньютон, подставив его значение из первого уравнения, и перепишите результат в форме $Q = \ldots$ Это новое уравнение должно показывать, что Q прямо пропорционально $(v+u)$, если X постоянно.

ж) Используйте результат, полученный в пункте е), для анализа данных измерений Милликена, которые приведены выше. Величина v равнялась 2,305 см/мин и не менялась, а разные значения u приведены выше. Если $(v+u)$ служит мерой полного заряда Q, то изменения *$(v+u)$ должны служить мерой* изменения заряда, *т. е. заряда, получаемого каплей от ионов и т. д.*

Изменение *заряда ΔQ определяется по* изменению *$(v+u)$, которое равняется изменению v + изменение u. Но v не меняется, так что изменение v равно нулю и ΔQ* определяется изменением *u.*

Рассчитайте изменения скорости подъема капли и используйте их для определения изменения заряда, *т. е. для определения заряда, подхваченного каплей.* Рассчитайте все значения изменения *u. Найдите одно элементарное изменение, которое объяснит все наблюдаемые изменения, и предположите, что оно соответствует* одному электронному заряду. *Затем скажите, сколько электронов должно было участвовать в каждом наблюдаемом изменении заряда.*

[Результаты Милликена не могли быть «абсолютно точны». Последний знак в приводимых им значениях, скорее всего, сомнителен. Так что вы не должны обращать внимания на небольшие различия. Что значит «неболь-

---

[1] Все скорости выражены в непривычных единицах, использованных Милликеном,— в *см/мин.* Нет нужды переводить их в *м/сек*, поскольку нам для расчетов нужны лишь относительные значения. Считайте, что K выражено в соответствующих единицах, а именно в *ньютон/(см/мин)*.

шие» — ваше дело догадаться. Милликен обсуждал этот вопрос, когда разбирал возможные ошибки своего эксперимента, и даже поссорился (вспомним яйца в кульке) с одним из своих соперников, который долго отстаивал существование «субэлектрона». Сомнения в последнем знаке, который приводит Милликен, означают, что случайная ошибка может приводить к изменениям Δu в 1 или 2%.]

• з) *Используя то изменение u, которое, согласно вашему решению, отвечает одному электронному заряду, вернитесь к значению $(v+u)$, которое определяет* полный *заряд, и рассчитайте, сколько электронных зарядов несла капля, начиная свое движение, когда скорость ее подъема u_1 составляла 2,516 см/мин.*

Расчеты в пунктах ж) и з) показывают, каким способом Милликен доказал, что все электроны имеют один и тот же заряд.

Универсальный атом электричества

Измерения с одной капелькой могли гарантировать существование основного атома электрического заряда. Но для того чтобы доказать, что основной «атом заряда» есть универсальная постоянная, Милликен должен был выполнить множество опытов с капельками различных размеров, с разными жидкостями и с различными способами ионизации. Если бы в каком-нибудь эксперименте обнаружилась нецелая доля введенного им гипотетического заряда вместо целого их числа, то он вынужден был бы выбрать меньшее значение «атома электричества» — и тогда необходимость переходить ко все меньшим и меньшим атомам разрушила бы как его надежды на успех, так и наши нынешние теории строения атомов.

Чтобы определить истинную величину заряда в кулонах, он рассчитал вес капельки по скорости ее падения и известному коэффициенту трения при обтекании воздушным потоком. Эти алгебраические выкладки довольно длинны, но не трудны; кроме того, в книге Милликена они прекрасно объяснены.

Результат: *каково бы ни было происхождение заряда, из какого бы материала ни состояла капелька, полный заряд на ней всегда равнялся целому числу, умноженному на один и тот же основной электрический заряд*

$$\underline{1{,}60\cdot 10^{-19}\ \textit{кулон.}}$$

Это величина отрицательного заряда каждого электрона (или положительного заряда, который остается у атома, ионизованного в результате потери электрона, или отрицательного заряда иона, полученного добавлением электрона к атому). Это и есть универсальный атом электричества.

Задачи к главе 36

Задачи 1, 2 — вводные, в начале главы. Задачи 3—8 — в тексте.

Задача 9. Электричество в сравнении с гравитацией

а) Атом водорода, лишенный своего единственного электрона, называется водородным ионом или «протоном». Он имеет заряд $+e$. Пусть водородный ион и электрон помещены на расстоянии d м друг от друга. Используя данные, приведенные ниже, запишите:
1) выражение для силы их электрического притяжения,
2) выражение для силы их гравитационного притяжения.

б) Рассчитайте отношение электрической и гравитационной сил, вычисленных в пункте а).

в) Почему, производя расчеты при изучении атомных моделей, мы обычно пренебрегаем гравитацией?

Данные. *Гравитационная постоянная $G=6{,}6\cdot10^{-11}$ ньютон·м²/кг². Постоянная закона Кулона $\mathcal{B}=9{,}0\cdot10^9$ ньютон·м²/кулон². Масса электрона $=1/1840$ массы водородного иона (массу водородного иона обозначим через M). Заряд электрона $e=-1{,}6\cdot10^{-19}$ кулон.*

Задача 10. Электрон в электрическом и гравитационном полях

В типичном осциллографе, использующем катодные лучи, для отклонения электронного пучка к верхнему краю экрана или к одной из его боковых сторон используется электрическое поле 10 000 в/м. Сравните силу, с которой такое поле действует на электрон, с силой тяжести, действующей на тот же электрон.

Задача 11. Осциллограф

В корпусе электронного осциллографа помещаются радиолампы (диоды с анодом и подогревным катодом), которые выпрямляют поступающий переменный ток, превращая его в полупериодные или двухполупериодные «всплески» постоянного тока, а также катушки индуктивности и конденсаторы для переделки этих всплесков в постоянное напряжение. Там есть трансформатор, подающий переменный ток, подлежащий выпрямлению, и обеспечивающий низкое напряжение для подогревных спиралек. Но основной деталью является сама электроннолучевая трубка.

а) Набросайте упрощенный чертеж такой трубки в разрезе или сделайте объемный рисунок, обозначив ясно основные части.

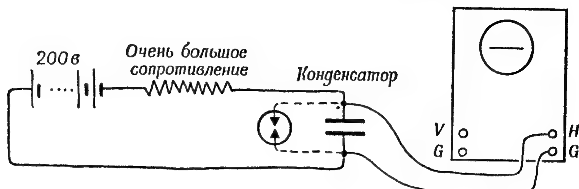
б) Объясните, откуда берется зеленое пятнышко на экране.

в) Чтобы сделать зеленое пятнышко ярче, *питание, подаваемое на трубку, можно изменить по крайней мере двумя различными способами. Попробуйте догадаться, что́ это за способы, и объясните, почему каждое из этих изменений дает желаемый эффект. (В современных трубках, когда поворачивается ручка увеличения яркости, ни один из этих двух наиболее очевидных способов не используется!)*

г) Когда разность потенциалов с прибора, проверяемого с помощью осциллографа, подается на клеммы V и G, пятнышко смещается вверх или вниз

(а если на клеммы подан переменный ток, то оно смещается попеременно вверх — вниз, вверх — вниз и т. д.). Объясните, как поданное напряжение вызывает такой эффект [1].

д) *Когда мы хотим зафиксировать зависимость этого движения вверх и вниз от* времени, *мы заставляем пятнышко* равномерно смещаться *по горизонтали (затем очень быстро обратно, затем снова в первоначальном направлении и т. д.). Это смещение обеспечивается цепью, которая тоже помещается в корпусе прибора; она в основных чертах изображена на фиг. 8.* Посмотрите на эту диаграмму и объясните, как работает такая система получения равномерного смещения (развертки). *(Примечание. Быстрое движение в обратном направлении требует быстрого переключения с помощью радиолампы. Описывать лампу здесь нет смысла. На схеме указано ее включение параллельно конденсатору. Лампа содержит газ, в нем происходит электрический пробой, когда разность потенциалов достигает определенного значения.)*



Фиг. 8. К задаче 11.

---

[1] *У большинства осциллографов в корпусе имеется также усилитель для увеличения сигнала, поступающего на клеммы, перед подачей его на отклоняющие пластины. В нем главным образом используются триоды (см. гл. 41, опыт 8).*

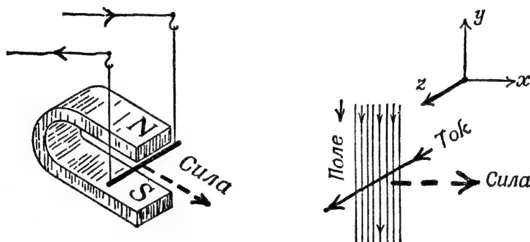
ГЛАВА 37 • МАГНИТНЫЕ КАТАПУЛЬТЫ: РАБОТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ИЗУЧЕНИЕ АТОМОВ

Краб, живущий на мелководье,— настоящий политик. Когда опасность угрожает ему сверху, он смотрит прямо перед собой и убегает вбок.

Автор неизвестен

Катапультирующие силы

На проволоку с током, расположенную поперек магнитного поля, действует выталкивающая сила, перпендикулярная и полю, и проволоке. Это та самая «катапультирующая сила», о которой упоминалось в гл. 34 (см. примечание на стр. 187). Если



Фиг. 9. Катапультирующие силы. Трапеция в магнитном поле.
Сила, поле и ток перпендикулярны друг другу так же, как взаимно перпендикулярны оси x, y, z.

ток потечет в обратную сторону или магнитное поле изменит свое направление на противоположное, то и направление действия силы изменится на обратное. Если проволока не закреплена, то она движется, как краб, упомянутый в эпиграфе [1].

[1] В школьных учебниках приводится правило для того, чтобы запомнить, как будет двигаться проволока: так называемое правило правой руки, на которой три пальца расставлены под прямыми углами друг к другу так, как изображено на фиг. 10. В школе этому правилу придают большое значение, оправданное, вероятно, только тем, что оно дает возможность задать на экзамене простой вопрос, в то время как явление, скрывающееся за ним, сложнее. Очень важно знать, что сила перпендикулярна магнитному полю и току — как большой палец на фиг. 10 перпендикулярен двум другим. Но

Катапультирующая сила действует на поток электронов в вакууме точно так же, как на ток, текущий по проволоке.

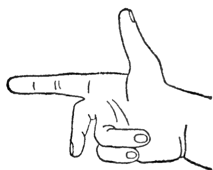
ДЕМОНСТРАЦИОННЫЕ ОПЫТЫ

Поднесите магнит к электронному осциллографу или к телевизионной трубке, и вы увидите, что пятнышко на экране сдвинется. Рассмотрев направление пучка электронов и направление магнитного поля, определите, куда сдвигается пучок — вдоль поля (как это было бы в случае электрического поля) или в сторону, крабообразно.

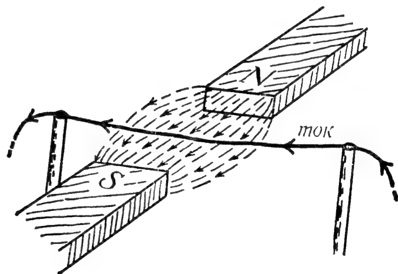
Пучок электронов, называемых катодными лучами, можно создать, выбивая электроны из молекул газов, оставшихся в разрядной трубке после откачки (или из металлического катода), и разгоняя их высоким напряжением электронной пушки, из ко-

---

в прямом или обратном направлении действует сила, вызывающая это «крабообразное» движение, часто не имеет значения. Если, например, магнитное поле направлено горизонтально вдоль линии север — юг и ток течет горизонтально вдоль направления восток — запад, то катапультирующая сила вертикальна и тянет проволоку вверх или вниз (фиг. 11). Важно знать, что сила *вертикальна*, а *вверх* или *вниз* она направлена, несущественно. При таком подходе разумным ответом на вопрос о направлении сил, токов и т. д.



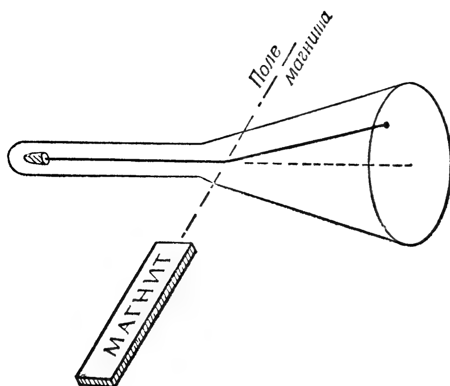
Фиг. 10. Как показать на пальцах три взаимно перпендикулярных направления.



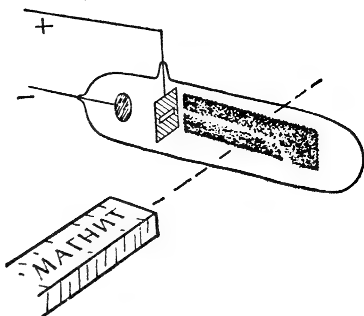
Фиг. 11. Куда направлена сила?

будет: *вперед — назад, влево — вправо, вверх — вниз.* В приведенном выше примере ответ будет «вверх — вниз».

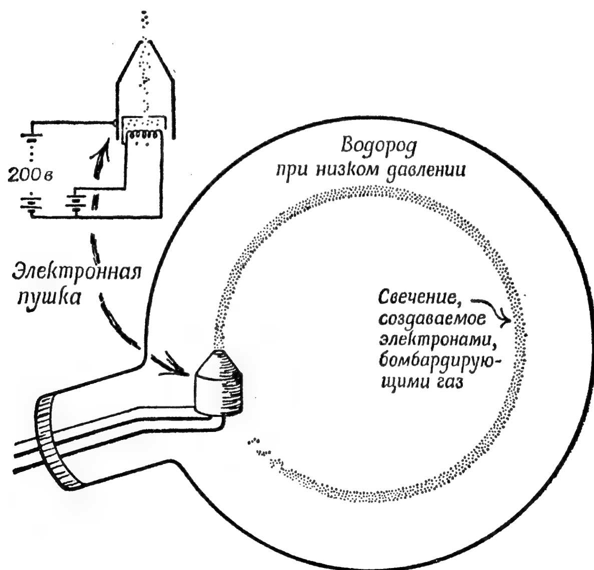
Если вы хотите иметь правило на более высоком физическом уровне, например для запоминания знака минус в «Законе Ленца» (там он существен), то воспользуйтесь другим простым правилом правой руки: сжатые в кулак пальцы показывают направление кругового магнитного поля, а отставленный большой палец — направление тока в прямой проволоке, создающей это поле. Правило в такой формулировке поможет предсказывать и направление катапультирующих сил. Это простое универсальное правило объяснено в замечании к задаче 1.



Фиг. 12. Катапультирующая сила.
Электронный пучок в осциллографе или телевизионной трубке.



Фиг. 13. Катапультирующая сила.
«Катодные лучи» (пучок электронов) в разрядной трубке с наискось установленным экраном.



Фиг. 14. Измерение отношения e/m для электронов.
Катушки с током создают магнитное поле, перпендикулярное плоскости рисунка.

торой они вылетают через прорезь в диафрагме. Эти электроны, ударяясь об экран, установленный слегка наискось вдоль их пути, заставляют его светиться и отмечают тем самым свой путь. Попробуйте поднести к трубке магнит или проволоку, по которой течет ток.

Действие катапультирующих сил еще более наглядно демонстрируется с помощью узкого пучка электронов из небольшой электронной пушки, когда он пропускается через пары ртути или водорода, заставляя их светиться (фиг. 14). Если приложить магнитное поле, то оно будет увлекать поток электронов в сторону, в направлении, перпендикулярном их движению, как Земля увлекает Луну. Светящаяся полоска замыкается в кольцо. Для этого магнитное поле должно быть перпендикулярно направлению движения электронов. Если скорость пучка имеет составляющую вдоль направления магнитного поля, то эта составляющая остается неизменной, превращая путь, по которому движется пучок, в сверкающую спираль. То же самое, только в грандиозных масштабах, происходит с потоками электронов, испускаемых Солнцем, когда они попадают в магнитное поле Земли.

Применения катапультирующих сил

Катапультирующие силы вращают валы электродвигателей; с их помощью работают амперметры; они препятствуют вращению роторов электрических генераторов; сортируют изотопы атомов; не дают сбиться с пути пучку частиц в циклотроне и дают возможность измерить величину отношения e/m у атомных частиц. Сначала мы кратко обсудим их «технические» применения, а затем «атомные».

Задача 1. Вводная к теме «Катапультирующие силы»

Примечание. При решении задач пользуйтесь следующими правилами для определения направления магнитных полей (стрелки отмечают направление, в котором будет двигаться северный полюс магнита (N-полюс):

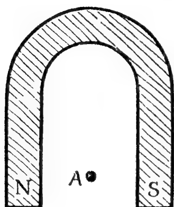
а) Силовые линии идут от *северного полюса* к *южному.*

б) Для кругового магнитного поля, окружающего проводник с током, справедливо следующее правило: сожмите пальцы ПРАВОЙ *руки в кулак вокруг большого пальца, направив его вдоль тока — сжатые пальцы покажут направление силовых линий (см. гл. 34).*

в) Направление магнитного поля, создаваемого кольцевым проводником с током, можно определить либо с помощью правила, изложенного в пункте б), либо по следующему рецепту: сожмите пальцы ПРАВОЙ *руки, а большой палец отставьте (как при одобрительном жесте «на большой»); держите*

руку так, чтобы согнутые пальцы указывали направление течения тока по витку, тогда большой палец покажет направление магнитного поля в центре катушки. (Фактически большой палец меняется ролями с остальными пальцами: когда он показывает направление тока в прямолинейной проволоке, то прочие пальцы согнуты подобно замкнутым силовым линиям кругового поля.)

На фиг. 15 показана проволока A, перпендикулярная плоскости рисунка в магнитном поле, создаваемом подковообразным магнитом NS. *Электрический ток течет по проволоке от читателя, за страницу.*

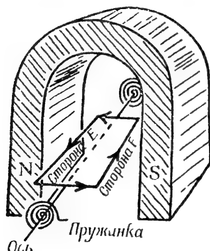


Фиг. 15. К задаче 1.

1) *Срисуйте этот эскиз в большем масштабе*, без проволоки, *и изобразите на нем поле магнита.*
2) *Срисуйте эскиз* без магнита *и изобразите магнитное поле тока.*
3) *Воспроизведите весь рисунок с изображением полного магнитного поля (см. гл. 34).*
4) *Укажите направление, в котором будет действовать сила, приложенная к проволоке.*

Задача 2. Амперметр

На фиг. 16 приведено объемное изображение витка проволоки, подвешенного на оси в пространстве между полюсами подковообразного магнита. Ток течет по витку в направлении, указанном стрелкой.



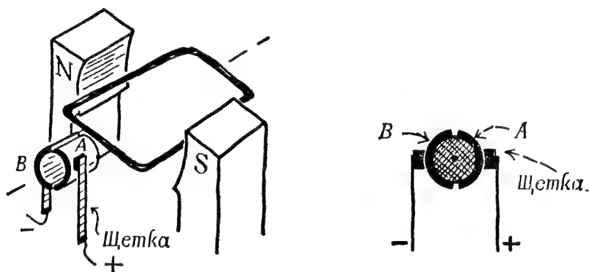
Фиг. 16. К задаче 2.

1) *Нарисуйте этот чертеж в разрезе, как на фиг. 15, но уже с двумя проволоками F и E (вместо одной A), изображающими виток в разрезе.*
2) *Покажите на своем рисунке полное магнитное поле.*
3) *В какую сторону направлена сила, действующая на проволоку F?*

4) А сила, действующая на проволоку E?
5) К чему приводит суммарное действие этих катапультирующих сил?
6) Тонкая спиральная пружинка, подчиняющаяся закону Гука, препятствует вращению витка на оси. Объясните, почему стрелка, прикрепленная к витку, будет отклоняться пропорционально силе тока в витке?

Электродвигатели

Мы теперь можем объяснить, как работает электродвигатель, рассматривая его как видоизмененный амперметр[1]. Виток больше не удерживается пружинками, а может свободно вращаться на оси, на которую насажен. Он окружен мягким железом для увеличения массы и усиления намагничивания. Постоянный маг-



Фиг. 17. Простейший электромотор с коллектором.

нит, создающий поле, заменяется электромагнитом, способным давать более сильное поле. Катапультирующие силы вращают виток, как и в амперметре. Когда ротор (виток+железный сердечник), поворачиваясь, пройдет по инерции через мертвую точку, он должен бы начать вращение в обратную сторону, если бы не остроумный прием: меняется направление тока в витке. Это происходит каждые пол-оборота, так что виток проворачивается еще на пол-оборота... и еще на пол-оборота... и т. д. Изменение направления тока производится автоматически переключателем, который сам вращается с ротором. Этот переключатель, называемый «коллектором», состоит из половинок разрезанного надвое медного цилиндра, укрепленного с помощью изолятора на оси витка. Ток приходит и уходит от источника через «щетки», трущиеся о медь.

[1] В другой, простейшей форме объяснение звучит так: один электромагнит, ротор, вращается другим электромагнитом, создающим поле, причем коллектор меняет направление тока в роторе каждые пол-оборота и тем обеспечивает непрерывность движения.

В один момент «щетка+» подает ток на полуцилиндр A, а с него через виток на полуцилиндр B и через «щетку — » на выход. Спустя пол-оборота «щетка+» подает ток на полуцилиндр B вокруг витка в обратном направлении, но виток при этом находится уже в новом положении, так что для поддержания непрерывного движения ток должен течь именно в этом направлении. Настоящие электродвигатели содержат множество витков, ориентированных по-разному, чтобы движение было более плавным, а соответствующий коллектор изменяет направление течения тока в каждом витке в нужный момент. Если интересуетесь деталями, посмотрите на настоящий электромотор.

Закон катапультирующих сил

Для описания и объяснения опытов, демонстрирующих «атомные» применения катапультирующих сил, нам нужно четкое правило, выражающее силу через ток, длину проволоки и т. д. Мы получим такое правило, но вывод его может показаться сложным — это будет самая сложная «формула» в нашем курсе. Однако это правило существенно для понимания атомной физики — без него нам пришлось бы давать вам детские описания аппаратуры без настоящего объяснения. Так что вам следует изучить приводимый ниже вывод правила и научиться пользоваться этим правилом[1].

В нашем курсе мы выбираем в качестве способа измерения тока определение скорости осаждения меди на электроде[2], так что магнитные эффекты, вызываемые током, являются предметом экспериментального исследования. Опыт показывает, что сила, действующая на проволоку с током, пересекающую магнитное поле, меняется прямо пропорционально изменению этого тока.

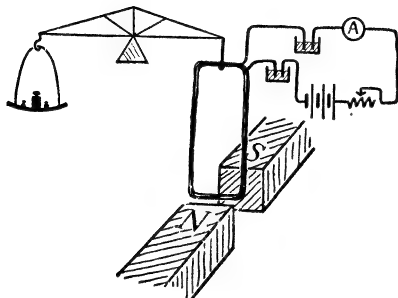
---

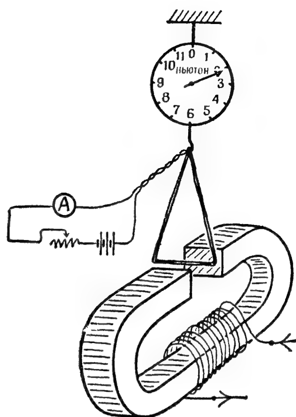
[1] Однако *не нужно* зазубривать вид формулы — так науку не изучают. Чтобы подчеркнуть, что учащиеся ничего не должны твердить как попугаи, все необходимые стандартные формулы и, в частности, те, которые мы сейчас рассматриваем, необходимо печатать в экзаменационных билетах.

[2] При рассмотрении электродинамики на более высоком уровне ток в наше время определяется и измеряется по производимым им магнитным эффектам. При такой системе описания магнитное поле тока изменяется в точности так, как изменяется ток — автоматически, *по определению* — то же самое относится и к силе, действующей на ток в магнитном поле. И при таком описании первый закон электролиза Фарадея является экспериментальным законом.

Основной *экспериментальный* факт заключается в том, что, когда мы увеличиваем «ток», чтó бы это ни означало, его химическое и магнитное воздействия увеличиваются в той же пропорции. Если мы выбираем один эффект как средство для измерения «тока», то эксперимент показывает, что другой эффект меняется пропорционально этому «току». Для сравнения вспомните роль закона Шарля в теории газов.

Как сила зависит от тока? Подвесим проволоку или виток к коромыслу весов. Пропустим через нее ток, величина которого измерена. Приложим сильное магнитное поле в направлении, перпендикулярном проволоке, и путем взвешивания определим катапультирующую силу. На фиг. 18 показана установка, позволяющая





Фиг. 18.

продемонстрировать, что

СИЛА ~ ТОКУ.

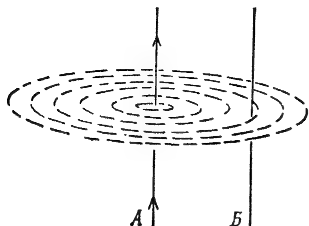
Чтобы выяснить, какие другие факторы определяют величину катапультирующей силы, мы сначала получим некоторые общие сведения, потом попробуем угадать простой закон, а затем проверим его.

Катушки, по которым проходит ток, ведут себя подобно магнитным стержням той же формы и размеров. Замкнутые витки с током подобны очень коротким толстым полосовым магнитам. Два витка притягивают, отталкивают или поворачивают друг друга в точности так же, как эквивалентные им полосовые магниты. Однако в отличие от полосовых магнитов такие витки обладают магнитными полями, которые проходят через них насквозь, причем силовые линии образуют замкнутые кольца (см. фигуры гл. 34). Магнитное поле, проходящее через центр кругового витка, почти однородно в области значительных размеров, и это обстоятельство мы будем использовать при измерениях.

Если токи текут по двум длинным параллельным проводникам *А* и *Б*, то каждый из них находится в круговом магнитном поле, создаваемом током другого проводника. Кольцевые силовые линии поля, создаваемого током *А*, пересекают проводник с током *Б* под прямыми углами. Катапультирующая сила, действующая на *Б*, перпендикулярна этим кольцевым линиям и направлению проводника *Б*. Следовательно, она должна быть направлена прямо в сторону проводника *А*. Если вы начертите силовые линии *суммарного* магнитного поля, то обнаружите, что проводники притягиваются, если токи в них текут в одном направлении, и отталкиваются, если направления токов противоположны.

Для получения простого закона катапультирующих сил нам не нужны

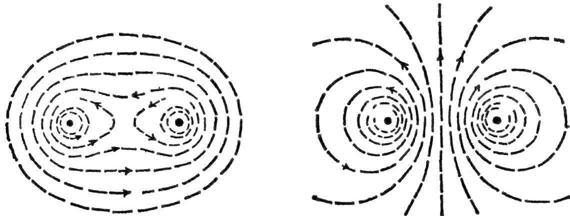
длинные проводники или витки целиком. Вместо этого попытаемся упростить задачу, выбрав для рассмотрения короткий отрезок проволоки, по которой идет ток. После этого мы сможем рассматривать длинные проводники, витки и целые электрические цепи как состоящие из коротких отрезков и находить силу, действующую на проводник в целом, складывая силы, действующие на отдельные отрезки. Этот прием полезен при расчете сил, действующих на катушки в электродвигателях, амперметрах и т. д. Если заменить короткий отрезок проводника с током на отдельный движущийся электрон, то наше и без того упрощенное рассмотрение упрощается до предела. Ампер и другие физики высказали много остроумных догадок о форме закона, который мы ищем, сто лет тому назад, но у них не было способа детально проверить свои догадки, поскольку в их распоряжении имелись только замкнутые цепи целиком. Однако они с успехом проверяли свои предсказания на электрических цепях разнообразных форм [1].



Фиг. 19. Катапультирующие силы между параллельными проводниками.

Ток одного из проводников создает поле, пересекающее другой проводник под прямым углом. Если этот второй проводник также несет ток, он подвергается действию катапультирующей силы. И тогда на первый проводник будет действовать сила, равная по величине и обратная по направлению.

Чтобы вывести нужный закон, начнем с рассмотрения двух длинных параллельных проводников, по которым текут токи I_1 *а* и I_2 *а* и которые находятся друг от друга на расстоянии d *м*. Они будут вызывать

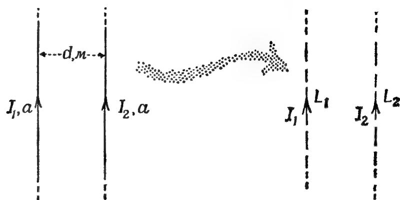


Фиг. 20. Суммарное магнитное поле параллельных токов.

Притяжение между токами, текущими в одном направлении, и отталкивание в случае токов, текущих в противоположных направлениях.

[1] Во многих учебниках «формула Ампера» просто вводится без всякого объяснения или экспериментального обоснования. Не удивительно, что электродинамика в таком изложении представляется чем-то вроде колдовства. Проследите за рассуждениями, чтобы убедиться в их разумности, но не заучивайте их.

катапультирующие силы, действующие в поперечном направлении, как показано на фиг. 22. После этого выберем два очень коротких отрезка проводников, находящихся друг против друга, L_1 и L_2, и не будем обращать внимания на остальные части проводов. Рассматривая их как части длинных параллельных проводников, можно ожидать, что каждый из отрезков будет окружен круговым магнитным полем. Если токи текут в одном направлении, то катапультирующие силы будут притягивать эти два «элемента тока» друг к другу. (Отрезок L_1, например, по которому течет ток I_1, пересекается магнитными силовыми линиями тока I_2 в проводнике под прямым углом; поэтому на него действует сила $-F$, направленная слева направо.)

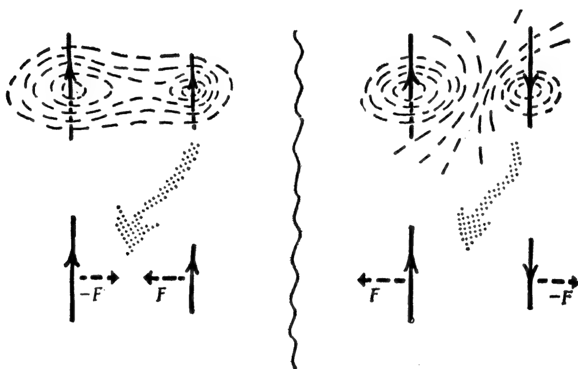


Фиг. 21. «Элементы токов».
На двух длинных проводниках выбраны короткие участки L_1 и L_2, один напротив другого.

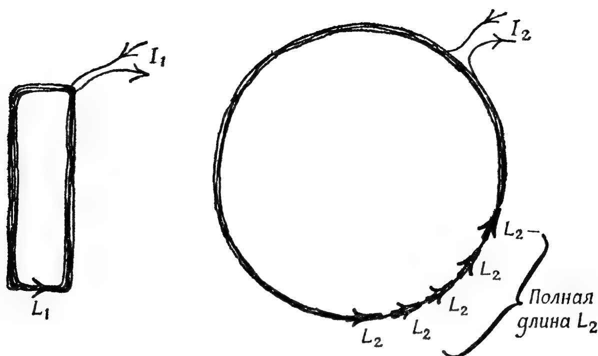
Из опыта, описанного выше, мы знаем, что эта СИЛА изменяется прямо пропорционально ТОКУ в проводнике:

$$F \sim I_1 \text{ (из опыта).}$$

Если бы мы увеличили длину отрезка проводника вдвое, соединив последовательно два проводника L_1, то, очевидно, сила, действующая на них, была бы равна двум F, т. е. на удвоенную длину пришлась бы удвоенная сила, т. е. СИЛА, действующая на исследуемый проводник, пропорциональна его ДЛИНЕ.



Фиг. 22. Силы, действующие между элементами токов.
Их направление подсказывается видом силовых линий суммарного магнитного поля.



Фиг. 23. Проверка закона катапультирующих сил с помощью элементов токов.

Измеряется сила, действующая на короткую сторону L_1. Кольцевой виток, несущий ток I_2, рассматриваем как последовательность коротких отрезков, отстоящих от центра на расстояние R.

$F \sim L_1$ (предположение, оправдываемое мысленным экспериментом или здравым смыслом),

$$F \sim I_1 \quad \text{и} \quad F \sim L_1, \quad \text{или} \quad F \sim I_1 L_1.$$

Но схема симметрична — кто может сказать, какой из проводников «действует» на другой, создавая магнитное поле, а какой «подвергается действию»?

$$F \sim I_2 L_2 \quad \text{так же, как} \quad F \sim I_1 L_1,$$

или

$$F \sim (I_1 L_1)(I_2 L_2).$$

Полный закон взаимодействия должен содержать расстояние между отрезками проводника. Простые опыты показывают, что F уменьшается с увеличением d. Зная это, что вы можете предположить? Наиболее правдоподобное предположение об обратной квадратичной зависимости, будучи подвергнутым опытной проверке, подтверждается. Тогда

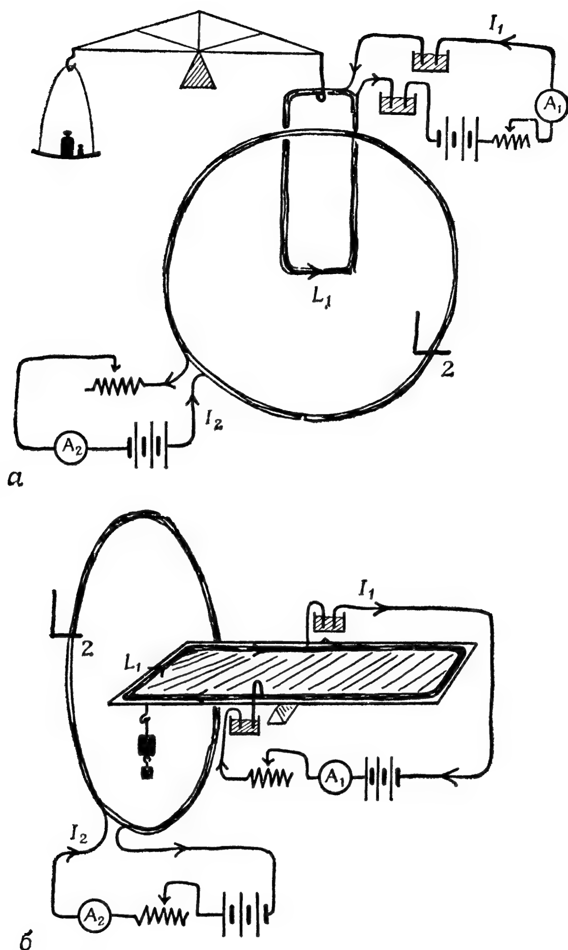
$$F \sim \frac{(I_1 L_1)(I_2 L_2)}{d^2},$$

или

$$F = B \frac{(I_1 L_1)(I_2 L_2)}{d^2},$$

где B — общий постоянный множитель.

Однако от закона в такой форме пользы мало. Необходим множитель, который бы учитывал отклонения направлений от параллельных и перпендикулярных — этих отклонений мы будем стараться избегать, выбирая простейшие геометрические условия. В опытах мы пользуемся замкнутыми цепями, так что будем считать L_1 короткой стороной длинного прямоугольного витка (а впоследствии участком траектории электрона). Для удобства мы возьмем не один короткий отрезок L_2, а много таких отрезков, соединенных последовательно, и образуем из них кольцевой виток, в центре которого будет располагаться L_1 (фиг. 23, 24). Тогда вокруг каждого из отрезков, образующих виток и несущих ток I_2 а, возникнет кольцевое магнитное поле, пересекающее отрезок L_1, расположенный в центре, и каждый из кусочков



Фиг. 24. Определение катапультирующей силы для частичной проверки закона.

а — длинный виток подвешен на коромысле весов, и ток на него подается через чашечки со ртутью, *б* — длинный виток кладется на рычажные весы, и ток также подводится через чашечки со ртутью.

кольца будет расположен на расстоянии R, равном радиусу кольца, от L_1. Тогда сила, действующая на L_1, дается выражением

$$F = B\frac{(I_1L_1)(I_2\cdot\text{первый отрезок } L_2)}{R^2} +$$

$$+ B\frac{(I_1L_1)(I_2\cdot\text{второй отрезок } L_2)}{R^2} +$$

$+$ и т. д. (по всем отрезкам L_2, образующим кольцо) $=$

$= B\dfrac{(I_1L_1)(I_2)}{R^2}$ (первый отрезок $L_2 +$ $+$ второй отрезок $L_2 + \ldots$ по всему

кольцу) $= B\dfrac{(I_1L_1)(I_2\ 2\pi R)}{R^2}$.

Если кольцо содержит N витков, то

$$F = B\frac{(I_1L_1)(I_2 2\pi RN)}{R^2}.$$

Сформулировав предполагаемый закон, мы проверяем его, измеряя силу, действующую на короткую сторону прямоугольной рамки с током, помещенной в центр кольцевого витка, по которому также течет ток. Пример такого рода изображен на фиг. 23, 24. Без экспериментальной проверки придется поверить этому закону на слово.

Определение постоянной *B*

Если в демонстрационном опыте, подобном тому, который изображен на фиг. 24, мы выполним все необходимые измерения (т. е. определим все линейные размеры, измерим оба тока и силу), то после этого сможем оценить постоянную B. Точные измерения дают значение $B = 0{,}000\,000\,100$, т. е. 10^{-7}. Это и в самом деле круглое число 1/10 000 000, поскольку величина ампера выбрана так, чтобы сделать его круглым. Следовательно, в нашем определении ампера через скорость осаждения меди мы вынуждены использовать некруглое число 0,000 000 329 *кг* меди в 1 *сек*. Отныне мы будем писать 10^{-7} вместо B, чтобы избежать путаницы — ведь есть другая постоянная $\mathcal{B}$, которую мы использовали при записи закона Кулона, определяющего силу, действующую между зарядами. Используя «закон катапульты», нужно помнить, что 10^{-7} — не просто число вроде 2π, а имеет размерность:

$$B = 10^{-7}\ \textit{ньютон}\cdot\textit{м}^2/\textit{а}^2\ \textit{м}^2 = 10^{-7}\ \textit{ньютон}/\textit{а}^2.$$

Поразительное предсказание Максвелла

(Рассуждения, приведенные ниже, слишком трудны для элементарного объяснения; скорее всего этот параграф останется загадкой. Можете его пропустить, если хотите, а можете и прочитать, чтобы познакомиться с рядом удивительных выводов.)

Для катапультирующих сил, т. е. для действия магнитного поля на ток, справедливо выражение

$$F = B\frac{(I_1L_1)(I_2L_2)}{d^2}, \quad \text{где} \quad B = 10^{-7}\ \textit{ньютон}/\textit{а}^2.$$

Здесь B относится к *магнитному* полю.

По закону Кулона сила, действующая между двумя электрическими зарядами, равна

$$F = \mathcal{B}\frac{Q_1 Q_2}{d^2}, \quad \text{где} \quad \mathcal{B} = 9{,}0\cdot 10^9 \ \textit{ньютон}\cdot\textit{м}^2/\textit{кулон}^2.$$

Здесь $\mathcal{B}$ относится к *электрическим полям*. Величины B и $\mathcal{B}$ совершенно разные. Мы не ожидаем наличия между ними какой-либо связи, пока не обнаружим, что изменение магнитного поля порождает поле электрическое. (Опыты с магнитами и катушками в гл. 41 продемонстрируют это; в них будет показано, что движущийся магнит создает электрическое поле и возбуждает ток в замкнутом проводнике.) Сто лет назад Максвелл высказал блестящую догадку, предположив, что наблюдается и обратный эффект: изменение *электрического* поля порождает *магнитное* поле. Постоянный ток, например поток электронов, движущихся с постоянной скоростью, сопровождается движущимся электрическим полем и стационарным магнитным полем. Но при изменении тока, например при ускоренном движении электронов вверх и вниз в радиоантенне, происходят изменения в движущемся электрическом поле и в сопутствующем магнитном поле. Эти *изменения* электрического и магнитного полей должны распространяться вместе в виде электромагнитной волны, причем изменения одного поля будут непрерывно порождать другое поле. Так Максвелл открыл радиоволны чисто теоретическим путем. Тогда две постоянные B и $\mathcal{B}$, одна для магнитного поля, а другая для электрического, должны быть связаны. Рассмотрим дробь

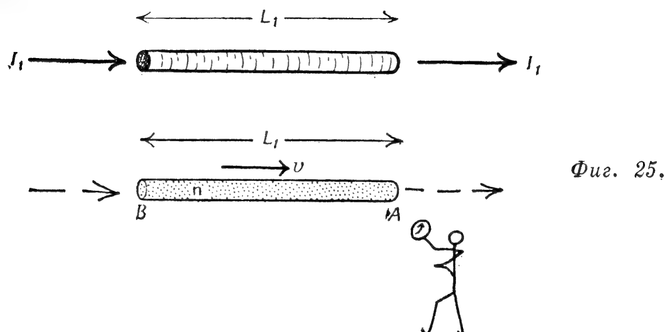
$$\frac{\mathcal{B}_{\text{для сил, действующих между электрическими зарядами}}}{B_{\text{для катапультирующих сил}}}.$$

Эта дробь имеет размерность ($\textit{ньютон}\cdot\textit{м}^2/\textit{кулон}^2$)/($\textit{ньютон}/\textit{а}^2$) или ($\textit{м}^2\cdot\textit{а}^2$)/ /$\textit{кулон}^2$ или $\textit{м}^2/\textit{сек}^2$, или $(\textit{м}/\textit{сек})^2$. Это размерность квадрата СКОРОСТИ. Возьмите в качестве величины дроби $9{,}00\cdot 10^9/10^{-7}$, или $9{,}00\cdot 10^{16}$, и извлеките квадратный корень, тогда получится значение скорости: $3{,}0\cdot 10^8$ *м/сек*. Это хорошо известная величина — *скорость света*. Максвелл в своей подробно разработанной теории показал, что дробь $\sqrt{\mathcal{B}/B}$ не просто имеет размерность скорости, но должна представлять собой скорость распространения волны, образованной переменными электрическим и магнитным полями. С такой точки зрения свет оказывается электромагнитными волнами, а результаты измерения его скорости согласуются со значением этой скорости, рассчитанным на основании чисто теоретических соображений по двум постоянным измеренным в электрической лаборатории. Свет, радиоволны, рентгеновские лучи... все электромагнитные волны распространяются в пространстве с этой скоростью.

Если вы видели, как измеряются обе постоянные B и $\mathcal{B}$, одна путем определения силы, действующей между двумя заряженными шариками, с помощью весов, а другая при оценке силы взаимодействия двух токов, то сами сможете рассчитать скорость света из этих измерений.

Катапультирующая сила, действующая на движущийся электрон или ион

Теперь нам нужно произвести еще одно изменение в нашем законе: заменить отрезок проводника L_1, по которому течет ток I_1, отдельным движущимся зарядом, таким, например, как летящий электрон. Катапультирующие силы, вне всякого сомнения, действуют на движущиеся заряды; вы сами можете посмотреть на отклонение пучка электронов в электроннолучевой трубке. И можно представить себе, что ток I_1 создается потоком электронов, текущим внутри проводника.



Фиг. 25.

Предположим, что ток I_1 создается за счет дрейфа n частиц, каждая из которых несет заряд Q и перемещается со скоростью v вдоль проводника L_1.

Поставим на выходном конце L_1 наблюдателя, чтобы он считал заряженные частицы, замечал время и вычислял ток I_1. Он пускает свой секундомер в тот момент, когда выходит первая частица A. Он останавливает его, когда некоторое время спустя показывается последняя частица, поскольку ей необходимо было пройти расстояние L_1 со скоростью v. На это уходит время, равное L_1/v *сек*. За этот промежуток наблюдатель видит появление n частиц, каждая из которых несет Q *кулон*. Он оценивает ток как ЗАРЯД/ВРЕМЯ, равный $nQ/L_1/v$ *кулон/сек* или nQv/L_1 *а*. Так что вместо I_1 *а* мы получили nQv/L_1 *а*. И вместо I_1L_1 в «законе катапульты» мы должны записать $(nQv/L_1)\cdot L_1$, или nQv. Тогда катапультирующая сила, действующая на порцию из n заряженных частиц, дается выражением

$$F = \frac{10^{-7}\,(nQv)\,(I_2\cdot 2\pi RN)}{R^2}.$$

Сила, действующая на *отдельную* частицу с зарядом Q и скоростью v, определяется как

$$F = \frac{10^{-7}(Qv)(I_2 \cdot 2\pi RN)}{R^2}$$

(мы заменили $I_1 L_1$ на Qv), или

$F = 10^{-7}(Qv)(H)$, где H называется магнитным полем, и в центре кольцевого витка H имеет величину $I_2 \cdot 2\pi RN/R^2$.

Это та сила, которая искривляет путь потока электронов или любых других заряженных частиц. Она всегда направлена перпендикулярно направлению движения, так что не может изменить величины скорости частиц. Их скорость меняется только по направлению. Эта сила, равная $10^{-7}QvH$, называется «силой Лоренца» в честь голландского физика Г. А. Лоренца, который впервые ввел ее при изучении электронов.

Задача 3. Путь электронного пучка в магнитном поле

Пучок электронов, каждый из которых имеет отрицательный *заряд, выстреливается горизонтально в направлении на север, в область, где существует вертикальное однородное магнитное поле.*

а) *Какое направление имеет сила, действующая со стороны этого магнитного поля на электроны пучка?*

б) *Когда направление пучка изменится под влиянием этой силы, то катапультирующая сила, действующая на электроны, также примет новое направление. Укажите это новое направление.*

в) *Направление движения продолжает изменяться, а величина скорости электронов сохраняется неизменной (в вакууме). Почему?*

г) *Величина силы, действующей в этом новом направлении, больше, меньше или та же самая?*

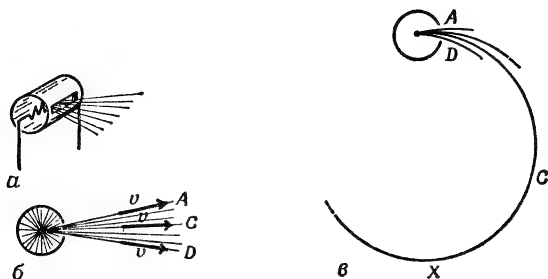
д) *Направление движения продолжает изменяться, и путь пучка, изгибаясь, образует кривую. Что это за кривая?*

е) *Предположим, вы хотите* замедлить *электроны. Как этого добиться? (Вопрос сложнее, чем кажется. Он требует тщательного размышления; на него вы должны ответить правильно. Существует несколько хороших методов. Ответ поясните рисунком.)*

Фокусировка

Пучок заряженных частиц, выпущенный перпендикулярно магнитному полю, движется по круговому пути. Это дает дополнительное преимущество: возможность его фокусировки. Нарисуйте несколько электронных пучков, узким веером вылетающих из пушки с одинаковой скоростью. Теперь приложите магнитное поле, перпендикулярное всем пучкам. Каждый пучок изогнется

в дугу окружности. На фиг. 26 центральный пучок веера C показан окружностью. Все пучки образуют окружности одного и того же радиуса, выходящие, однако, из пушки каждая в своем собственном направлении. На рисунке показаны пучки A и D



Фиг. 26. Фокусировка.

Электронные пучки, расходящиеся веером, фокусируются магнитным полем. Попробуйте завершить рисунок.

в начале своих круговых орбит. Если провести полные окружности, то они будут пересекаться друг с другом вблизи точки X, диаметрально противоположной точке вылета. Это свойство фокусировки используется в измерениях и при конструировании ускорителей.

Задача 4. Фокусировка

Нарисуйте узкий веер электронных пучков, выходящих из маленькой щели (скорость частиц в пучке одинакова). Тщательно вычертите их круговые орбиты с помощью циркуля, или обводя карандашом донышко стакана либо бутылки, и постройте диаграмму, демонстрирующую свойство фокусировки.

Задача 5. Поток ионизованных атомов в магнитном поле

Поток ионизованных водородных атомов (т. е. ядер водорода, протонов) пропускается с большой скоростью через однородное магнитное поле.

а) Какую форму будет иметь траектория пучка?

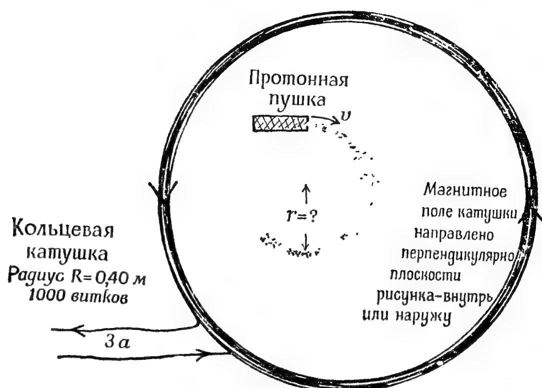
б) Рассчитайте радиус траектории пучка r в этом поле, используя данные, которые вы получите, отвечая на вопросы 1) и 2), приведенные ниже.

Данные. *Каждый атом имеет массу $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг, заряд $+1{,}60 \cdot 10^{-19}$ кулон и скорость 100 000 м/сек.*

Магнитное поле создается током, протекающим по кольцевой катушке. Катушка насчитывает 1000 витков, имеет радиус 0,40 м и через нее пропущен ток 3 а.

Пучок движется вблизи центра катушки в той же плоскости, в которой располагаются ее витки.

1) *Рассчитайте силу, действующую со стороны магнитного поля на каждый движущийся атом.*



Фиг. 27. К задаче 5.

2) *Помня, что эта сила перпендикулярна направлению движения атомов, рассчитайте радиус их траектории. (Не забывайте, что для того, чтобы частица двигалась по кругу, на нее должна действовать сила mv^2/r, направленная к центру круга. Эта сила как раз и порождается магнитным полем, действующим на движущуюся частицу.)*
Предупреждение. *Не путайте r с R — радиусом витков катушки.*

Задача 6. Пучок электронов в магнитном поле

Предположим теперь, что в задаче 5 в качестве движущихся частиц выбраны не ядра водорода, а электроны с той же скоростью, тем же зарядом (только отрицательным), но массой, в 1840 раз меньшей. Опишите траекторию такого пучка в том же магнитном поле.

Стенки термоядерной установки

Если нам удастся запустить управляемую термоядерную установку для получения энергии в больших количествах, то среду, в которой будет протекать термоядерная реакция, нельзя будет удержать в аппарате, стенки которого будут изготовлены из обычного вещества, так как для осуществления реакции потребуется температура в десятки и сотни миллионов градусов. В задаче 7 намечен возможный путь использования магнитного поля для удержания заряженных частиц с целью осуществления термоядерной реакции.

Задача 7. Отклонение пучка электронов в магнитном поле

Предположим, что электронный пучок, описанный в задаче 6, кроме составляющей скорости, перпендикулярной полю, имеет еще некоторую составляющую, параллельную *полю. (Например, его полная скорость может быть в 1,41 раза больше, чем в задаче 6, и иметь направление, образующее с направлением поля угол 45°. Тогда скорость будет раскладываться на две одинаковые по величине составляющие: 100 000 м/сек в направлении, перпендикулярном полю, и 100 000 м/сек вдоль поля.) Опишите траекторию пучка в этом случае.*

Определение скорости электромагнитных волн

(Рассуждения, приведенные ниже, грубо приближенны, и изложение лишь с натяжкой можно назвать правдоподобным, поскольку мы пренебрегаем всеми ограничениями, которым пришлось бы подчиниться, если строго придерживаться теории относительности и современной электродинамики. Можете пропустить эти рассуждения, а можете и прочитать, только не принимайте их слишком всерьез. Это лишь попытка показать, как можно осмыслить предсказания Максвелла, располагая только теми сведениями, которые вам уже известны. В такой форме это, конечно, не настоящая физика, и приведенные ниже рассуждения должны лишь напомнить вам о двух вещах:

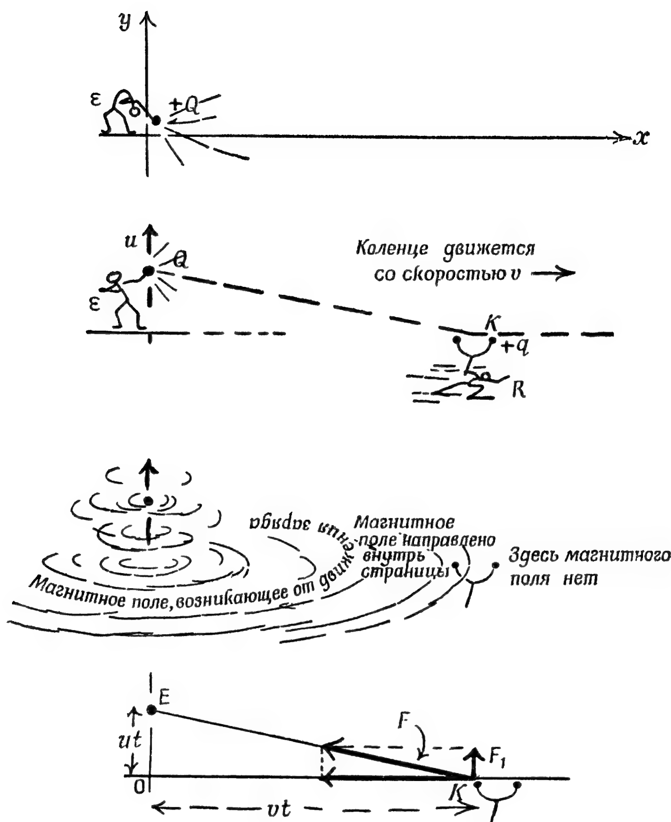
а) хотя для настоящего вывода потребовалась бы довольно сложная математика, в существе явления ничего таинственного нет;

б) выработка настоящего строгого вывода часто начинается с такого вот грубого, приближенного рассмотрения: чтобы продержаться до конца в первом раунде, хороши любые средства.

Мы будем придерживаться того же хода рассуждений, что и при нахождении скорости, с которой волна бежит по туго натянутой веревке. Прежде чем разбираться в выводе, приведенном ниже, вернитесь еще раз к рассуждениям в конце гл. 10. Там мы нашли скорость, рассматривая движение излома, «коленца», вдоль веревки. Здесь мы также рассчитаем скорость движения «коленца», только не по веревке, а по силовой линии электрического поля.

Предположим, экспериментатор $\mathscr{E}$ неподвижно держит заряд $+Q$ в начале координат. Внезапно он дает заряду толчок, и тот начинает двигаться вверх со скоростью u. После этого экспериментатор поддерживает движение заряда Q с постоянной скоростью u вдоль оси y. Сообщение о том, что заряд Q вышел из состояния покоя и начал движение со скоростью u, будет распространяться в стороны в виде волны, бегущей, если хотите, вдоль силовых линий поля заряда Q. Исходное электрическое поле, создаваемое зарядом Q, имеет горизонтальную компоненту вдоль оси x. Но когда с момента начала движения заряда пройдет время t и он переместится на расстояние ut, силовая линия, которая была сначала горизонтальна, теперь будет направлена от Q слегка наклонно вниз до «коленца» K, после которого она снова превращается в исходную горизонтальную линию. Сообщение о начале движения заряда Q только что пришло в точку K. Излом, «коленце» — это характерная точка профиля волны, и она движется вдоль линии со скоростью v.

Теперь предположим, что другой экспериментатор, R, бежит вдоль линии рядом с «коленцем» со скоростью v, не обгоняя его и не отставая. Когда мы рассматривали волну, бегущую по веревке, то вводили воображаемого бегуна, который нес ящичек, заключавший в себе излом веревки, без приложения к веревке какой-либо силы, так что все силы, необходимые для поддержания движения «коленца», обеспечивались натяжением веревки. В рассматривае-



Фиг. 28. Спустя время t заряд $+Q$ находится в точке E на расстоянии ut от начала координат O, а «коленце» K — на расстоянии vt от O.

мом теперь случае представим себе бегуна, несущего небольшую, сделанную из изолятора рукоятку, на которую насажены два заряда. Рукоятка имеет форму рогатки Y, и заряды $+q$ и $-q$ сидят на ее рожках. Мы стоим на месте, смотрим, как он бежит, и видим, что *результирующего* заряда на рогатке нет, он равен нулю, а поэтому мы не ожидаем, что на рогатку Y благодаря наличию заряда Q или благодаря его движению будет действовать какая-то сила. Мы скажем: «Посмотрите, на рогатке нет никакого суммарного заряда, значит, ее можно поместить в маленький черный ящичек, который будет пере-

мещаться без посторонней помощи, знать ничего не зная об изломе силовой линии».

Если рогатка Y движется впереди «коленца» или за ним, то оба заряда $+q$ и $-q$ находятся в совершенно одинаковом электромагнитном поле, так что мы действительно не обнаруживаем действия на Y какой-либо результирующей силы, присутствие заряда Q и его движение ничем себя не обнаруживают. Но даже если Y движется «грудь в грудь» с точкой излома силовой линии (так что заряд $+q$ находится впереди этой точки, а $-q$ позади), то результирующая сила, действующая на Y, будет по-прежнему равна нулю, и в этом случае Y сможет двигаться со скоростью v без помощи со стороны бегуна. Пробный предмет, движущийся вместе с волной, как пловец на доске на гребне прибоя, не будет ощущать действия какой-либо силы со стороны волны. (Это предположение существенно, но оно не является ни очевидным, ни убедительным [1]. Если вы принимаете его, читайте дальше и посмотрите, как мы теперь получим скорость v. Если вы считаете его не соответствующим действительности, значит, вам удалось найти в цепи рассуждений слабое звено.)

Теперь рассмотрим те силы, которые все-таки действуют на $+q$ и $-q$ в точке излома. Передний заряд, $+q$, чувствует только горизонтальную силу, толкающую его вперед, прочь от заряда Q, поскольку он находится впереди точки излома, в первоначальном горизонтальном поле. А другой заряд, $-q$, притягивается к Q наклонной силой, тянущей его назад и вверх. Однако заряд $-q$ чувствует и действие катапультирующей силы тоже, поскольку заряд Q движется, и «новость» о начале этого движения до заряда $-q$ уже дошла. Попробуйте путем рассуждений установить направление этой катапультирующей силы, и вы убедитесь, что она направлена *вертикально вниз*. Если скорость Q мала, так что расстояние ut, пройденное им, мало по сравнению с расстоянием vt, пройденным изломом ($u \ll v$), то горизонтальные силы, действующие на $+q$ и $-q$, практически погашают друг друга, поскольку и $+q$, и $-q$ находятся практически на одинаковом расстоянии от заряда Q, создающего поле. На заряд $+q$ не действует никакая вертикальная сила, так что вертикальные силы, действующие на $-q$, должны скомпенсироваться, чтобы суммарная полная сила, действующая на рогатку Y, равнялась нулю. Вот чему равны эти две вертикальные силы:

1) Вертикальная составляющая силы электростатического притяжения, действующего между $+Q$ и $-q$.
   Это вертикальная составляющая силы, равной $\mathscr{B}Qq/r^2$, т. е.

$$\mathscr{B}\frac{Qq}{r^2}\cdot\frac{OE}{EK} \quad \text{или} \quad \mathscr{B}\frac{Qq}{r^2}\cdot\frac{ut}{vt},$$

поскольку расстояние EK практически [2] равно расстоянию vt, пройденному волной.

---

[1] Заметьте, что и на Q не действует никакая сила со стороны зарядов на рогатке Y, поскольку, хотя каждый из них сам по себе и может быть велик, они бесконечно близки друг к другу. Следовательно, экспериментатор $\mathscr{E}$ не должен прикладывать силы или затрачивать энергию для поддержания Q в движении — этот заряд будет двигаться и без его помощи. Следовательно, вряд ли можно ожидать, что Q со своей стороны действует с отличной от нуля результирующей силой на Y.

[2] Даже в этом приближении надобность отпадает, если рассчитать как следует магнитное поле с учетом *наклонности* направления EK.

2) Катапультирующая сила, действующая на заряд $-q$, движущийся со скоростью v, возникает из-за движения заряда Q со скоростью u. Здесь мы имеем дело с *движущимися* зарядами, а не с *короткими проводниками*, несущими ток. Для них мы должны в выражении «закона катапульты» писать Qu вместо I_1L_1 и qv вместо I_2L_2. Кроме того, эти два «тока» не параллельны друг другу, а образуют друг с другом прямые углы. Однако магнитное поле от (Qu), когда заряд Q не успел уйти далеко от начала координат, все еще будет круговым и будет пересекать «ток» (qv) под прямым углом (фиг. 28), так что выражение для катапультирующей силы должно быть по-прежнему справедливым:

$$\text{Катапультирующая сила} = B\,\frac{(I_1L_1)\,(I_2L_2)}{r^2} = B\,\frac{(Qu)\,(qv)}{r^2}\,.$$

Если в итоге на Y не действует никакая сила, то силы 1) и 2) должны быть равны по величине и противоположны по направлению:

$$\mathcal{B}\,\frac{Qq}{r^2}\cdot\frac{ut}{vt} = B\,\frac{(Qu)\,(qv)}{r^2}\,.$$

Сократим Q, q, t, u и r^2. Все детали, характеризующие наш мысленный эксперимент, исчезли:

$$\frac{\mathcal{B}}{v} = Bv \quad \text{или} \quad v^2 = \frac{\mathcal{B}}{B}\,.$$

Следовательно, скорость волны $v = \sqrt{\mathcal{B}/B}$. Это скорость, с которой должен распространяться излом. Волну любого другого профиля можно рассматривать как состоящую из многих «коленец», движущихся с одинаковой скоростью. Это и есть универсальная скорость движения электромагнитных волн в пустом пространстве, одинаковая для волн любой формы и любых частот.

ГЛАВА 38 • РАЗДЕЛЕНИЕ АТОМОВ

Не само знание, но любовь к познанию характеризует ученого. В отличие от него «философ» — это человек, построивший систему представлений, охватывающую, как он думает, все наиболее ценное из того, что стоит знать. Если человек горит жаждой познания и проверяет свои рассуждения, сопоставляя их с данными опыта, каждый ученый будет признавать в нем брата по духу независимо от того, насколько малы знания этого человека.

К. С. Пирс

Сортировка

ВЫПИСКА ИЗ ФИРМЕННОГО КАТАЛОГА, РАЗОСЛАННОГО БАНКАМ: «Эта машина с механическим приводом сортирует и считает с большой скоростью перемешанные монеты... будет считать все монеты от пенни до полудоллара, будет непрерывно засыпать их в мешки или заворачивать заранее заданные количества монет в бумажные обертки.. работают два ряда циферблатов: один регистрирует каждый сорт монет в долларах и центах... другой ряд регистрирует каждый номинал монет численно, например 399 пенни, 204 никеля и т. д. ... .»

В давние времена банкиры имели время и озабоченно подсчитывали свою кассу. Определение округленного веса мешка монет пришло на смену трудоемкому счету. Современные банкиры покупают машины. В давние времена ученый был даже в худшем положении, чем банкир: он мог разделять атомы химически по элементам и взвешивать «полными мешками», но не мог взять в руки отдельные атомы. Он предполагал, что природа, подобно хорошему чеканщику, выпускает все атомы одного элемента подобными, но это предположение было ошибочным. В настоящее время у нас есть прибор, который сортирует атомы столь же эффективно, как машина — монеты. Этот прибор — *масс-спектрограф* — использует средства, описанные в двух предыдущих главах (электрические и магнитные поля), для разделения какого-нибудь образца на отдельные атомы и взвешивает атомы. Если элемент содержит не более одного сорта атомов, это взвешивание будет образцом химического анализа, но масс-спектрографическое взвешивание даст нам значительно больше, чем химический анализ. Эксперименты с первыми масс-

спектрографами помимо разделения атомов одного элемента на составляющие показывали простое правило — целочисленность масс ядер. Позднее более точные измерения показали небольшие отклонения от этого правила, и эти отклонения, разбивающие нашу веру в простоту природы, привели к сведениям огромной важности об атомном ядре.

Прежде чем рассмотреть современные масс-спектрографы, мы должны взглянуть на историю методов разделения атомов, которая началась в начале нашего столетия.

Осколки атомов

Все электроны имеют отрицательный заряд и все подобны друг другу. Однако положительные ионы — остатки атомов, у которых оторваны электроны,— сильно различаются. Разделение атомов на электроны и положительные ионы — это первое расщепление «неделимых» единиц материи, и оно дает первые наметки атомной структуры.

Наиболее легкий путь получения осколков атомов для их последующего анализа — бомбардировка молекул газа.

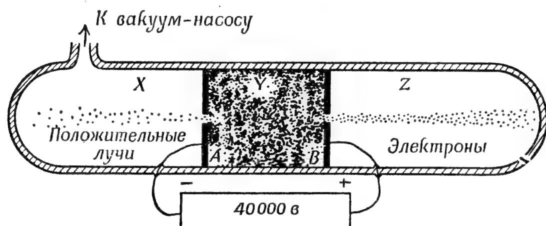
В настоящее время мы обстреливаем образец газа пучком электронов из маленькой электронной пушки. Полвека тому назад, когда начали производить разделение атомов, бомбардировка осуществлялась приложением высокого напряжения к газу, находящемуся при низком давлении,— при этом ионы и электроны производили еще больше ионов при соударениях. В светящемся электрическом разряде между электродами происходило хаотическое движение электронов, положительных и отрицательных ионов, нейтральных атомов и молекул, рентгеновских лучей и видимого света. Электроды (металлические пластины) вводились в трубку с двух сторон, в каждом электроде высверливались отверстия (фиг. 29). Поэтому потоки заряженных частиц проходили через отверстия в пластинах в «заанодное» и «закатодное» пространство. Пучок электронов простреливался через отверстие в аноде. Противоположно заряженный пучок простреливался в противоположном направлении; этот пучок оказался состоящим из значительно более тяжелых частиц, несущих положительные заряды. Каждый из пучков был подвергнут разделению с помощью электрического и магнитного полей.

Пучок электронов наилучшим образом обнаруживает свои свойства в почти полном вакууме, когда имеется мало молекул газа, которые могут замедлять электроны при столкновениях, или

ионов, ослабляющих электрическое поле. Именно тогда ясно проявляется единая черта этих частиц независимо от вещества, из которого они получены: одно и то же значение e/m.

Для получения потока *положительных частиц* в трубке должно быть оставлено некоторое количество газа, поставляющего ионы, которые и образуют поток положительно заряженных частиц.

В анализируемом пространстве должен поддерживаться достаточно хороший вакуум, который сохраняется с помощью непрерывной откачки при очень тонком отверстии в электроде.



Фиг. 29. Разрядная трубка с газом при низком давлении, с отверстиями в электродах, позволяющими потокам электронов и положительных ионов распространяться за пределы электрического поля.

Измерения отклонений положительных пучков показали, что они состоят из частиц с массой много большей, чем у электронов; массы частиц зависят от сортов газов и паров в разрядной трубке:

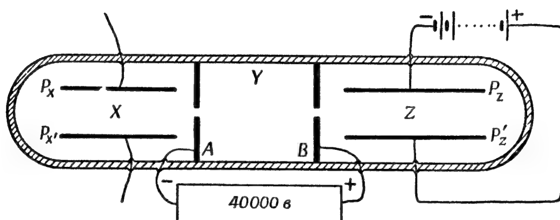
водород имеет массу $1840\ m$ и заряд $+e$ в сравнении с массой электрона m и зарядом электрона $-e$;
кислород имеет массу $16\times1840\ m$ и заряд $+e$, а иногда $+2e$;
углерод (полученный испарением твердого образца или разрушением молекул газа, подобного CH_4) имеет массу $12\times1840\ m$ и заряд $+e$.

Взвешивание осколков атомов, освобожденных от некоторого числа электронов, явилось одним из важнейших экспериментов в атомной физике. Из этих экспериментов могло быть сделано первое предположение *о внутренней структуре атомов*: часть атома должна состоять из легких электронов, бо́льшая часть массы атома приходится на положительный остаток. Таким образом, атомы —

«нерасщепляемые» элементарные частицы химии — были разделены на компоненты. Задача 1 иллюстрирует общую идею такого разделения в упрощенном виде.

Задача 1. Разделение атомов в газовом разряде

На фиг. 30 показана разрядная трубка с электродами A и B в виде металлических пластин. К электродам приложена большая разность потенциалов для создания сильного поля в области Y между электродами. Предполагается, что во внешних областях X и Z горизонтальное электрическое поле отсутствует. В области Y находится небольшое количество газа, в газе образуются электроны и положительные ионы.



Фиг. 30. Разрядная трубка с отклоняющими пластинами (см. задачу 1).

Большинство электронов, увлекаемых полем, ударяется в пластину B, но некоторые проходят через отверстие, образуя пучок в области Z. Вертикальное электрическое поле, создаваемое пластинами P_z и P'_z, отклоняет этот пучок вниз. В области Z действует и магнитное поле, перпендикулярное плоскости страницы; это поле также отклоняет пучок электронов вниз. Рассмотрим теперь действие таких же полей на положительные ионы, проходящие через отверстие в пластине A в область X.

а) Между пластинами P_x и P'_x действует такое же электрическое поле, как между пластинами P_z и P'_z. Куда это поле будет отклонять положительный пучок — вверх или вниз?

б) В области X действует такое же магнитное поле, как и в области Z. Куда это поле будет отклонять положительный пучок — вверх или вниз? Почему?

в) Электроны, проскакивающие область Z, были образованы вблизи пластины A и прошли в области Y расстояние, на котором происходит полное падение напряжения V электронной пушки (как это часто делается в подобных трубках). Предположим также, что некоторые положительные ионы с одинаковым по величине зарядом +e стартуют вблизи пластины B и появляются в области X, тоже испытав действие полного падения напряжения V. Приложение одинаковых электрических полей между пластинами P и P′ к потокам в области X и Z будет давать одинаковые отклонения обоих потоков и не будет показывать разницы в массах частиц. Объясните,

почему отклонения должны быть равными. (Не делайте подробных расчетов. Придумайте качественное объяснение при рассмотрении горизонтальных скоростей или аргументируйте объяснение приближенными алгебраическими оценками.)

г) 1. Если два вида частиц имеют одинаковые заряды и проходят через одну и ту же область пространства с падением напряжения V, все они имеют одинаковую кинетическую энергию

$$\frac{1}{2} Mv_i^2 = Ve \text{ для ионов,}$$

$$\frac{1}{2} mv_e^2 = (-V)(-e) \text{ для электронов.}$$

Теперь предположим, что одинаковое магнитное поле H действует на оба потока (в областях X и Z). Сила, действующая на частицу с зарядом Q, движущуюся со скоростью v, определяется выражением

$$F = 10^{-7}(Qv)(H).$$

Каждый поток будет двигаться по круговой траектории. Сравните кривизну траекторий, записывая отношение радиусов R_i/R_e в зависимости от M и m.

2. Если отношение M/m составляет около 26 000 (как это имеет место для ионов азота) и определенное магнитное поле искривляет пучок электронов в окружность радиусом 0,05 м, то какой радиус будет иметь ионный поток?

д) Если некоторые частицы стартуют с середины области Y и проходят путь, где падение потенциала составляет только ½ V, каково будет их отклонение в

1) электрическом поле?

2) магнитном поле?

Как видно из задачи 1, электрические поля сами по себе не дадут нам возможности сортировать движущиеся ионы по массам. Дело в том, что электрическое поле уже накладывалось вдоль потока посредством ускоряющего напряжения пушки; повторное использование электрического поля, действующего поперек потока, не даст новой информации. Но при наложении магнитного поля на пучок, созданный действием напряжения пушки, мы можем сортировать ионы в пучке. Если мы приложим высокое напряжение между пластинами *A* и *B* (фиг. 30) и приложим магнитное поле к пучку в области *X*, мы получим отклонения, пропорциональные значениям *e/Mv*.

При анализе положительных пучков повышаются требования к высокому вакууму, и нужны значительно более сильные поля, чем при анализе пучка электронов. Задача 1, *д*) показывает, что ионы, которые стартуют в различных точках области *Y*, будут иметь различные энергии; таким образом, даже ионы с одинаковым значением *e/M* будут давать различные отклонения. Однако

мы можем создать приспособления для получения потока ионов с равными скоростями или с равными кинетическими энергиями, и тогда отклонения ионов позволят проводить прямые измерения e/M для каждого сорта ионов.

Первые измерения

Грубые измерения перед самым началом XX века начали показывать, что частицы в положительных пучках имеют массы атомов и молекул (если их заряд $+e$ или несколько единиц $+e$). В 1910 г. Дж. Дж. Томсон пропустил тонкий пучок через электрическое и магнитное поля, подобранные таким образом, чтобы ионы давали определенные метки для каждого значения e/M, несмотря на различие в их скоростях. Его измерения показали следующее (см. таблицу в гл. 36).

> Водород из разрядной трубки обнаруживает значение e/M около 10^8 *кулон/кг*, такое же, как для ионов водорода при электролизе. Метка ионов H^{++} с удвоенным значением отношения ЗАРЯД/МАССА не появляется; таким образом, нет никаких признаков того, что атом водорода может терять более чем один электрон. Однако Томсон нашел половинное значение, которое он правильно интерпретировал как принадлежащее ионизованным молекулам водорода, H_2^+.
>
> В разрядной трубке с кислородом Томсон регистрировал ионы с e/M в 1/16 от e/M для ионов H^+, по-видимому, ионы O^+. Он также регистрировал удвоенное значение указанной величины, которую можно отнести к O^{++}. Записывая значения e/M, Томсон мог сравнивать между собой массы атомов многих элементов, или, как химики давно называли их, «атомные веса». Таким образом, ион O оказался тяжелее иона H в 16 раз.
>
> Помещая в разрядную трубку газ метан, CH_4, Томсон получил метки для масс 1, 12, 16, принадлежащих H^+, C^+, ионизованным молекулам метана CH_4^+ и даже нестабильным группам, таким, как CH_2^+, — не известным в то время химикам свободным радикалам.
>
> Ион ртути мог нести до восьми «+» зарядов.

Эти данные согласовались с данными для ионов и атомов, полученными ранее при проведении электролиза и исследовании химических свойств.

Но затем возник изумительный сюрприз: газ неон в трубке дал странную запись. Атомный вес неона был хорошо известен

и составлял 20,2, но запись показала *две* метки: одну для ионов с массой в 20 раз тяжелее иона водорода, другую, тусклую метку для массы 22.

Задача 2. Решающий опыт

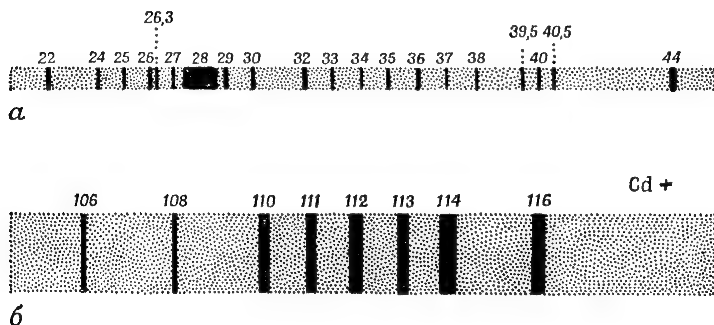
Томсон был уверен, что метка «20» относится к ионам неона, так как интенсивность ее была пропорциональна количеству неона в смесях газов, которые он исследовал. Слабая линия 22 должна относиться к более тяжелой разновидности атомов неона или должна быть отнесена к странному соединению неона с примесным водородом в трубке — NeH_2. *Как поставить простой решающий опыт для выбора между этими двумя возможностями?*

Изотопы

Существуют *два* неона, два атома-брата у одного и того же элемента. Один из них на 10% тяжелее другого. Они были названы *изотопами*. Этот термин уже был введен для обозначения подобных атомов при исследовании радиоактивности.

Масс-спектрографы

После открытия изотопов неона возникло широкое поле деятельности для разделения атомов. Одна хитроумная схема за дру-



Фиг. 31. Вид спектра масс.

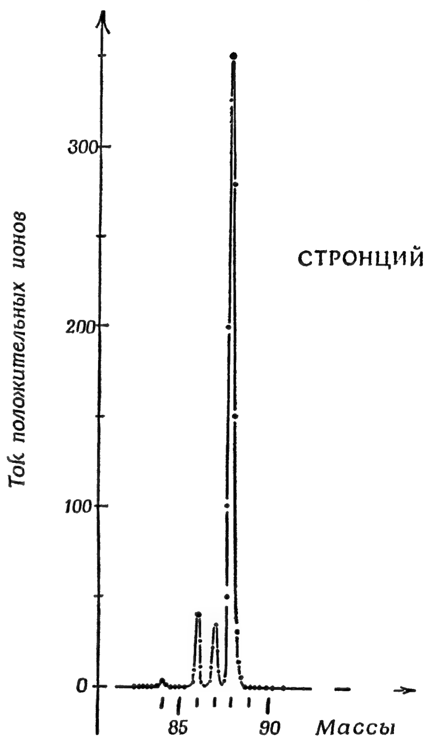
(Эскизы с масс-спектрограмм на фотопластинке. Метка для каждой ионной массы на оригинале серая или черная. Здесь они показаны только черным цветом.)
а — спектр масс, записанный Астоном от газообразного брома (80 и 81) и двуокиси углерода (44), введенных в разрядную трубку. CO_2 поставляет ионы, которые дают метку 44 (CO_2^+), 22 (CO_2^{++}) и 28 (CO^+). Бром поставляет ионы, которые дают метки 39,5 и 40,5 (Br^{++}), а также 26,3 и 27 (Br^{+++}). В разрядной трубке имеются также следы H, Cl, S и др. элементов, и они поставляют ионы, которые дают метки 35 и 37 (Cl^+), а также 36 и 38 (HCl) и др. (из книги: F. W. A s t o n, Mass Spectra and Isotopes, E. Arnold Ltd, London).
б — спектр масс, полученный Демпстером. Ионы кадмия (Cd^+) были получены методом «горячей искры», проскакивающей между кадмиевыми электродами в вакууме. Фотография показывает метки всех изотопов и их относительное содержание (из: Proc. Am. Phil. Soc. 75 (1935)).

гой изобретались для «фокусировки» потоков положительных лучей в четкие тонкие метки, которые могли обеспечить точные измерения масс атомов.

Это был удивительный метод определения масс атомов различных веществ. Трудности в выделении отдельных элементов не существовали! Каждый тип атомов дает свои метки, и мы можем даже оценить пропорции составляющих вещество атомов по плотности меток.

Правда, некоторые молекулярные группы также дают метки, но опытный масс-спектрографист может расшифровывать масс-спектры так же легко, как врач расшифровывает состав крови.

Сначала ионы фокусировались на экран, покрытый специальным минералом, который светился, когда ионы ударялись об экран. Затем были использованы фотопластинки или фотопленки—после проявления темные метки появлялись в тех местах, в которые попадали ионы (фиг. 31, 32). Во всех этих опытах получали метки для каждой атомной массы. Расположение меток на полосе фотопленки сильно напоминает оптические линейчатые спектры, получаемые от светящегося газа. Это подсказывает подходящее наименование — *масс-спектрограф* для прибора, который дает развернутую запись масс атомов. Мы иногда называем этот прибор *масс-спектрометром*, если он предназначен для очень точных



Фиг. 32. Запись на масс-спектрографе.

Эта запись получена М. Б. Сэмпсоном на масс-спектрографе, подобном показанному на фиг. 34. При анализе ионов стронция запись показывает, что наиболее распространенным является изотоп 88 (82%), другие изотопы имеют массовые числа 87, 86, 84. Не видно отметки для радиоактивного изотопа стронций-90, содержание которого составляло 0,05% от общего количества атомов стронция.

измерений. Можно заметить, что оптические спектры различных элементов отличаются друг от друга, но спектры различных изотопов одного элемента различаются несущественно.

В настоящее время ионы одной массы обычно фокусируются на тонкую щель. Ионы проходят через щель и собираются на коллекторе; при разрядке коллектора возникает небольшой электрический ток, который можно усилить и зарегистрировать. Изменяя поле, можно пропускать через щель потоки с разными массами, при этом на графике возникает острый пик для каждой атомной массы. На фиг. 32 показан такой график.

Рассчитанные по результатам точных измерений массы являются массами ионов. Для нахождения масс нейтральных атомов мы должны добавить к массе иона массу потерянного электрона (потерянных электронов), что легко сделать.

Гипотеза Проута

Открытие изотопов дало новый ответ на старую химическую загадку, заключающуюся в приблизительной целочисленности масс атомов. Столетие тому назад Проут отметил эту простую закономерность для химических «атомных весов». Принимая массу атома водорода за 1,01, получаем (используя современные величины, найденные при точных химических взвешиваниях) следующие значения атомных весов:

Литий	6,94	Углерод	12,01
Азот	14,01	Кислород	16,00
Натрий	23,00	Сера	32,06
Вольфрам	183,92	Уран	238,07

(Наилучшее приближение к целочисленности получается при использовании шкалы, в которой масса кислорода принята равной точно 16, чем при использовании шкалы, где за единицу принята масса водорода. В кислородной шкале масса водорода — 1,008. Специалисты-химики давно пользуются кислородной шкалой. Сейчас мы также воспользовались этой шкалой.)

Приведенный выше список — специальный подбор немногих чисел, хорошо согласующихся с гипотезой Проута. В списке Проута были более округленные величины. Целые числа встречались в этом списке слишком часто для того, чтобы это можно было объяснить счастливой случайностью. Проут предположил, что все атомы построены из водородоподобных блоков. Но многочисленные исключения упорно портили картину; наибольшую

неприятность доставлял хлор, для которого тщательные химические измерения давали атомный вес 35,5 при каждом новом измерении.

Сорок лет спустя масс-спектрографы принесли спасение и показали, что *нет* атомов хлора с атомным весом 35,5, но есть смесь двух изотопов, 35 и 37, в такой пропорции, что средний атомный вес составляет 35,46.

Задача 3

В масс-спектрограмме хлора имеются также метки у чисел 36 и 38. Разумно предположить, что эти метки обусловлены другими ионами, помимо простого иона Cl^+, *хотя они всегда появляются при использовании хлора.*

а) Существование какого иона вы можете предположить, если известно, что в приборе использовались другие газы для сравнения?

б) Как можно проверить ваше предположение на этом же приборе?

Массы изотопов

Многие элементы имеют по два и более изотопов. Массы изотопов приблизительно целочисленны по отношению к H=1 или O=16. Даже кислород, атомный вес которого химики решили принять равным 16 в качестве стандарта, имеет довольно редкий изотоп с массой 17 [1] (поэтому мы теперь используем определенный изотоп кислорода O^{16} в качестве стандарта массы 16,0000).

При более тщательном исследовании у водорода найден тяжелый изотоп с удвоенной массой, называемый теперь дейтерием[2].

Еще позднее был найден изотоп водорода утроенной массы, называемый теперь тритием. Он радиоактивен.

Конструкция масс-спектрографов

В задачах 4 и 5 обсуждаются конструкции существующих масс-спектрографов.

---

[1] Природный кислород состоит из трех стабильных изотопов: O^{16} (99,759%). O^{18} (0,204%) и O^{17} (0,037%).— *Прим. перев.*

[2] Это не молекула водорода и не два обычных атома H, слабо между собой связанных. Это один атом удвоенной массы, который сопровождает обычный водород во всех химических реакциях, не отделяясь от него. Только очень сильная атака гамма-лучей или столкновения при невероятно высоких температурах могут разбить ядра дейтерия на нейтроны и протоны (ядра обычного водорода).

Таблица

Примеры масс-спектрографических результатов

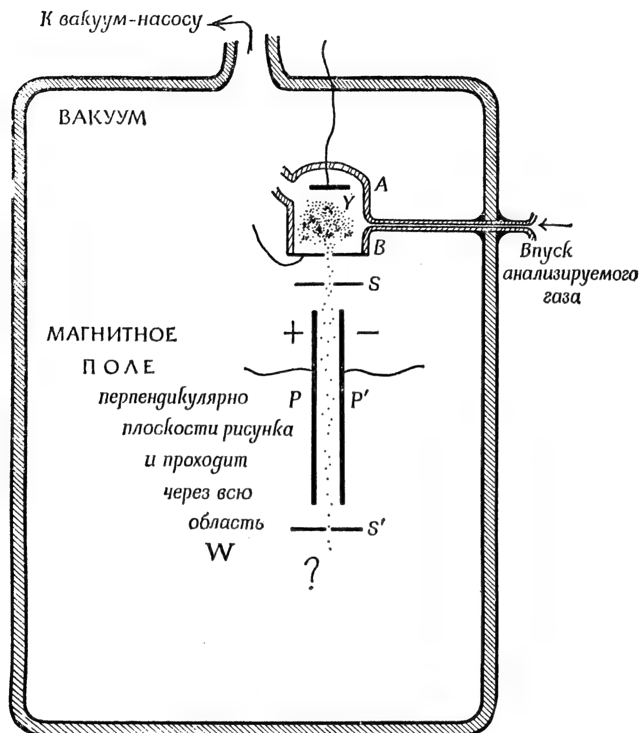
Здесь приведено несколько примеров, отобранных для иллюстрации смесей изотопов, найденных в природе. Массы даны с округлениями. Результаты прецизионных измерений будут обсуждаться в следующем разделе. Точные значения отличаются от приведенных целых чисел на величины до 0,1. Принятая шкала: масса атома $O^{16} = 16,00000$.

Элемент	Изотопы: масса	Изотопы: относительное содержание, %	Химический «атомный вес» *для природной смеси изотопов*
Водород	1,008	99,98	1,008
(дейтерий)	2,015	0,02	
(тритий *)	3,017	—	
Гелий	4	100	4,00
	(3)	(очень редкий)	
Литий	6	8	6,94
	7	92	
Хлор	35	75	35,46
	37	25	
Медь	63	68	63,58
	65	32	
Йод	127	100	126,95
Ртуть	196	0,1	200,6
	198	10,1	
	199	17,0	
	200	23,3	
	201	13,2	
	202	29,6	
	204	6,7	
Уран*	234	0,006	238,1
	235	0,7	
	238	99,3	

* Радиоактивны.

Задача 4. Масс-спектрограф Бейнбриджа с селектором скоростей

Этот прибор, предложенный Дж. X. Бейнбриджем, сначала выделяет ионы с определенным значением скорости, а затем производит определение e/M с помощью магнитного поля (фиг. 33). Электрическое поле в области Y создает



Фиг. 33. Масс-спектрограф типа Бейнбриджа с селектором скоростей (см. задачу 4).

скопления ионов. Сильное электрическое поле между электродами A и B движет поток ионов через щель S, ионы обладают широким набором скоростей. Ионы проходят узкий коридор между пластинками P и P', к которым приложена постоянная разность потенциалов. В объеме коридора действует также постоянное магнитное поле, напряженность которого перпендикулярна плоскости чертежа. Электрическое поле между P и P' смещает в сторону ионы, движущиеся вдоль коридора вниз. Магнитное поле ориентировано так, что оно смещает ионы в противоположную сторону. Таким образом, ионы в потоке должны проходить сквозь скрещенные электрическое и магнитное поля. Пройти вниз по всему коридору и успешно достигнуть щели S' смогут только те ионы,

для которых действия электрического и магнитного полей взаимно погашаются. Показать, что все ионы с различными значениями e и M, но с некоторой одинаковой скоростью могут пройти селектор, *проведя следующие расчеты:*

а) Если разность потенциалов между P и P' составляет V в, а расстояние между пластинками равно d м, то напряженность поля между пластинками будет (V/d) в/м. С какой силой будет действовать это поле на ион, имеющий заряд e кулон и движущийся со скоростью v м/сек? (См. гл. 33.)

б) Если напряженность однородного магнитного поля равна H, то сила, действующая на движущийся заряд, определяется уравнением $F=10^{-7}(Qv)(H)$. С какой силой будет действовать магнитное поле на движущийся ион?

в) Рассчитайте скорость ионов, которые могут пройти коридор до щели S'.

Те ионы, которым удалось пройти через вторую щель (S'), выходят в область W, где нет электрического поля. Но то же самое однородное магнитное поле с напряженностью H действует во всей области W. (Вектор напряженности перпендикулярен плоскости чертежа.)

г) Предскажите траекторию в области W для пучка ионов с одинаковой массой M и скоростью v, найденной выше.

д) Где должен фокусироваться такой пучок, выходящий из S' в виде узкого веера?

е) Где будет фокусироваться пучок, если ионы имеют ту же выделенную скорость v, что и в пункте д), но удвоенную массу $2M$?

ж) Набросайте эскиз установки и укажите в нем подходящее место для фотопленки, которая должна регистрировать сфокусированные пучки ионов с массами M, $2M$, $3M$ и т. д., движущиеся с выделенной скоростью v.

Задача 5. Масс-спектрограф с моноэнергетическим ионным источником

В этой конструкции (фиг. 34) все ионы с различными массами проходят через область с одним и тем же падением напряжения. При этом все ионы с единичным зарядом $+e$ будут иметь одинаковую кинетическую энергию (ионы с удвоенным зарядом $+2e$ будут получать удвоенную кинетическую энергию, но метки этих ионов можно отличить от остальных). Ионная пушка имеет три части: 1) маленькая электронная пушка для бомбардировки газа с целью получения ионов. При этом попутно совершается работа расщепления молекул газа на отдельные атомы; 2) в области между пластинкой B и сеткой G ионы осторожно направляют в сторону сетки малой разностью потенциалов между B и G. 3) Ионы дрейфуют через сетку и встречают сильное электрическое[1] поле с большой разностью потенциалов V между G и диафрагмой пушки M. Таким образом, все ионы, двигающиеся из области позади G, получают практически одинаковую кинетическую энергию, так как они проходят всю область падения напряжения пушки V в.

Предположим, что поток, выходящий из пушки, содержит ионы с массой M кг и зарядом $+e$ кулон. Предположим также, что эти ионы попадают

[1] Эта схема, обеспечивающая получение ионами одинаковой кинетической энергии, кое в чем напоминает прием, применяемый в ресторане для того, чтобы избавиться от трудного гостя, не беспокоя других посетителей. Управляющий вступает с ним в джентльменский разговор и медленно ведет его к двери. Там жертва получает полный изгоняющий импульс от швейцара.

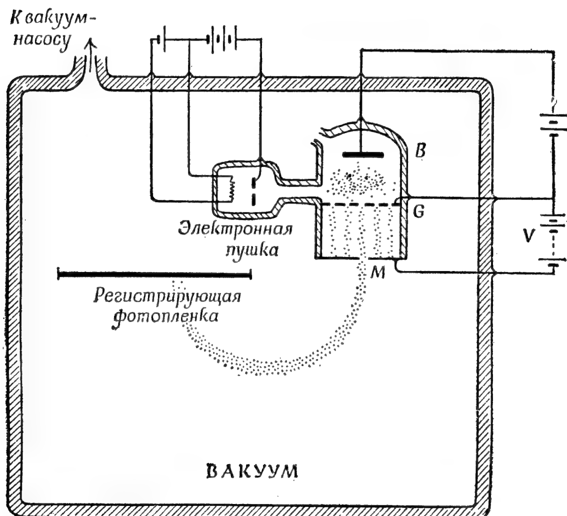
в однородное магнитное поле с напряженностью H, перпендикулярной их траектории. При этом их траектория превращается в окружность радиусом r.

а) Объясните, почему кинетическая энергия каждого иона, равная $^1/_2\ mv^2$, должна составлять eV дж.

б) Покажите, что радиус r круговой траектории должен описываться выражением

$$r = \frac{\sqrt{2V \cdot M/e}}{10^{-7}H}.$$

Примечание. Сила, действующая на заряд Q, движущийся со скоростью v через магнитное поле с напряженностью H, составляет $F = 10^{-7}\,(Qv)(H)$.



Фиг. 34. Масс-спектрограф с моноэнергетическим ионным источником и с фокусировкой магнитным полем (см. задачу 5).

в) Предположим, что V и H остаются постоянными и имеется два вида ионов с одинаковыми зарядами, но различными массами — одна масса вдвое больше другой. Как будут различаться радиусы фокусирующих окружностей для этих ионов?

г) Предположим, имеются два вида ионов, масса одного из них вдвое больше массы другого, как в пункте в). Предположим, что ускоряющее напряжение V изменено, а H осталось постоянным. Во сколько раз пришлось изменить V, чтобы тяжелый ион фокусировался при том же радиусе, что и легкий ион?

В задаче 5, *в*) предполагается, что фотопленка, располагающаяся в фокусирующей области, облучается пучками ионов различных масс и при проявлении демонстрирует четкие метки для каждого значения массы.

В задаче 5, *г*) потоки ионов с различными массами последовательно попадают в одну и ту же выходную щель при изменении ускоряющего напряжения. Ионы попадают на коллектор позади щели; ионный ток усиливается и показывает относительное содержание ионов данной массы. График зависимости ионного тока, проходящего через щель от ускоряющего напряжения, показывает распределение ионов по массам. Типичный график показан на фиг. 32.

Химия и массы атомов

В давних измерениях, которые мы описали, массы атомов сравнивались с массами, полученными при химических взвешиваниях; но это было взвешивание огромных количеств атомов в предположении, что все атомы одного элемента одинаковы. В течение более чем столетнего бурного развития химии изотопы никогда себя не проявляли. Все изотопы одного элемента имеют одинаковые химические свойства. Свидетельство этого — постоянство содержания изотопов хлора (35 и 37), который дает постоянный «атомный вес» 35,46 в самых различных весовых определениях хлора из различных источников, из различных процессов, в которых хлор участвовал, прежде чем он был выделен и взвешен.

За полстолетия до того, как были исследованы ионы в газах, имелись хорошие измерения заряда атомов, переносящих ток в растворах солей. Продукт, получаемый при электролизе, легко взвесить, можно также измерить полную величину перенесенного заряда и таким образом найти точное значение e/M для каждого типа ионов. Когда первые измерения с ионами в газах дали подобные же значения e/M, появилось предположение, что одинаковые атомные частицы несут одинаковый заряд и в газах, и в жидкостях, и это предположение казалось надежным.

Но измерение e/M при электролизе производится при взвешивании больших количеств веществ, и для каждого элемента находятся усредненные значения отношения

$$\frac{\text{ЗАРЯД } e}{\text{СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ } M \text{ ДЛЯ ИОНОВ ДАННОГО ЭЛЕМЕНТА}}.$$

Усреднение не создавало причин для беспокойства, пока все атомы одного элемента считались идентичными — очевидное допущение, которое считалось безусловной истиной при рассмотрении атомов во всей химии XIX столетия.

Даже в начале 1900-х годов идентичность атомов казалась правильным представлением, исключение составляли некоторые проблемы специальной области — исследования радиоактивности. Конечным продуктом различных рядов (генеалогических деревьев) является металл свинец; стало казаться, что различные ряды, которые были открыты, оканчиваются атомами свинца с немного различающимися массами. Был и другой намек, связанный с поведе-

нием некоторых промежуточных членов рядов, которые вели себя подобно свинцу, но определенно имели необычные массы,— мы теперь знаем, что это был радиоактивный свинец.

Термин *изотопы* напрашивался для таких атомов одного элемента с различающимися (слегка) массами. Однако этот намек о неравенстве масс был отнесен к числу специальных представлений учения о радиоактивности, и идентичность атомов оставалась правилом вплоть до анализа положительных лучей, показавшего, что атомы *являются* изотопами.

Присутствие таких «неравных двойников» явилось как неожиданным, так и полезным в химии. Теперь, когда мы знаем о существовании изотопов и можем разделять их, используя различия физических свойств, мы применяем изотопы, как *индикаторы* в химических реакциях. Дейтерий, тяжелый изотоп водорода, особенно полезен как свидетель, показывающий пути атомов водорода при синтезе органических молекул.

Изотопы могут быть разделены различными физическими методами (см. описание диффузионного метода в гл. 25 и 30). В случае необходимости мы можем использовать масс-спектрограф для разделения изотопов и сбора точно известных количеств каждого иона в местах, где они фокусируются. Такой метод использовался для выделения легкого изотопа урана U^{235} в ранних опытах с делящимися материалами. Сейчас разделенные изотопы некоторых элементов широко применяются в качестве меченых атомов.

Маленькие несоответствия

Открытие изотопов принесло новое признание гипотезе Проута. Однако очень точные измерения на масс-спектрографах, в которых ионные потоки собираются в очень острых фокусах, показывают, что массы атомов *не являются точно целыми числами* (в какой бы шкале они ни выражались). Отклонения выглядят незначительными до тех пор, пока мы не переведем их в эквивалентную разность энергий, используя формулу $E=mc^2$. А вот тогда мы обнаружим, что масс-спектрограф смог обеспечить точные измерения, необходимые для расчетов при ядерных превращениях.

Выделение энергии при делении и синтезе. Примеры использования точных значений масс атомов

Исследование и использование соотношения $E=mc^2$ в ядерной физике будет описываться в гл. 43. Между тем если вы пожелаете принять кое-что на веру, то сможете увидеть приложение этой формулы к точным масс-спектрографическим измерениям. Мы попытаемся рассмотреть два упрощенных примера из ядерной физики — один из них реакция синтеза, другой — реакция деления.

Расчеты не являются абсолютно точными, а результаты не имеют практического значения. Однако примеры хорошо иллюстрируют характер энергетических расчетов.

Мы используем следующие значения масс[1] из современных масс-спектрографических данных (за счет которых можно даже повысить на один-два порядка точность расчета):

Таблица масс атомов

(в шкале, где масса атома кислорода принята за 16,0000)

H^1	(обычный водород)	1,0081
He^4	(обычный гелий)	4,0039
Ag^{107}	(самый легкий изотоп серебра)	106,939
Xe^{128}	(один из самых редких изотопов ксенона)	127,944
U^{235}	(делящийся изотоп урана)	235,116

Синтез

Предположим, что четыре атома водорода могут соединиться вместе и образовать один атом гелия. Осуществить такую реакцию химическими методами невозможно. Превращения элементов, по-видимому, происходят в очень горячих звездах. Излучение Солнца, по всей вероятности, поддерживается ядерными реакциями, происходящими по схеме кругового цикла, но подобные реакции невозможны при обычных земных температурах. Предположим, мы хотим получить около 4 *кг* гелия. Тогда нам потребуется четыре порции водорода, по 1 *кг* каждая. По точному расчету возьмем

$$4 \times 1{,}0081 \text{ кг вещества} \longrightarrow 4{,}0039 \text{ кг вещества.}$$

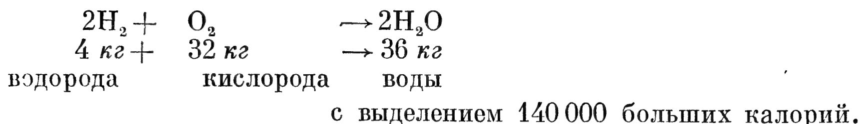
Предположим, и это будет правильно, что разность 0,0285 *кг* составляет массу энергии, освобождающейся в виде излучения, кинетической энергии и т. д. Доверяя соотношению $E=mc^2$, мы будем ожидать выделения энергии:

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{ЭНЕРГИЯ}} &= (\Delta m)\, c^2 = \\ &= 0{,}0285 \text{ кг} \cdot (3{,}0 \cdot 10^8 \text{ м/сек})^2 \approx \\ &\approx 2{,}6 \cdot 10^{15} \text{ дж} \approx \\ &\approx 600\,000\,000\,000 \text{ больших калорий.}\end{aligned}$$

---

[1] Это массы целых атомов. В гл. 43 мы будем вычитать суммарную массу атомных электронов и оперировать с массой ядра. Но, оставляя электроны в атоме, как мы это здесь делаем, мы не меняем существенно расчетов.

Сравним это значение с «молекулярным синтезом» атомов водорода и кислорода при образовании воды:


ХИМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

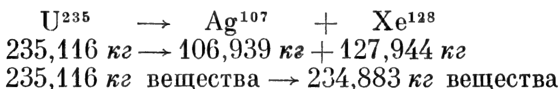
$$\underset{\text{водорода}}{4\ кг} + \underset{\text{кислорода}}{32\ кг} \longrightarrow \underset{\text{воды}}{36\ кг}$$

с выделением 140 000 больших калорий.

При использовании того же самого количества водорода (соединяющегося с кислородом воздуха) выделение энергии в четыре миллиона раз меньше.

Деление

Предположим, что атом U^{235} делится на два более легких атома — атом серебра Ag^{107} и атом газа ксенона Xe^{128} — и что другие частицы не появляются. (Большинство событий деления сопровождается освобождением нейтронов, поэтому, хотя ксенон и серебро и являются возможными продуктами деления, это — искусственный пример. Однако он подходит для оценки освобождающейся энергии.) Предположим, превращению подвергается 235 *кг* урана:


ЯДЕРНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

$$U^{235} \longrightarrow Ag^{107} + Xe^{128}$$

$$235{,}116\ кг \longrightarrow 106{,}939\ кг + 127{,}944\ кг$$

$$235{,}116\ кг\ \text{вещества} \longrightarrow 234{,}883\ кг\ \text{вещества}$$

Принимая $E = mc^2$, мы ожидаем освобождения энергии:

$$\Delta \text{энергия} = (\Delta m)\, c^2 = 0{,}233\ кг \cdot (3{,}0 \cdot 10^8\ м/сек)^2 \approx 2 \cdot 10^{16}\ дж \approx 5\,000\,000\,000\,000\ \text{больших калорий}.$$

Сравним это с химическим разрушением молекул тринитротолуола (ТНТ). При взрыве 235 *кг* ТНТ освобождаемая энергия составляет около 850 000 больших калорий. Молекула ТНТ легче атома урана на 3%. Таким образом, одна молекула ТНТ при взрыве дает выход энергии в шесть миллионов раз меньше, чем один атом урана (по приведенной выше оценке).

Иголка в стоге сена. Значение прецизионных измерений

Если мы хотим знать «вес стога сена» для научных целей, не так важно, будет ли находиться в стоге иголка во время взвешивания. Но если мы захотим знать «вес иголки» *и можем взвесить ее только вместе с сеном*, то мы должны будем произвести взвешивание стога сена с иголкой и просто стога сена с очень высокой точностью, если хотим найти малую разность с некоторой точностью.

Снова и снова в истории науки малые разности, полученные в прецизионных экспериментах, порождают новые большие открытия: ранние астрономические записи дали возможность Гиппарху открыть прецессию точек равнодействия; страсть Тихо Браге к точным измерениям дала Кеплеру его верную 8-минутную разность, «благодаря которой...»; предельно точные измерения оптических спектров дали возможность расширить представления атомной модели Бора, и, наконец, высокая точность масс-спектрографических измерений масс атомов предзнаменовала превращения ядерной энергии, которыми мы теперь управляем.

Предварительные задачи к главе 39

Задача 1. Камера Вильсона, применяемая в ядерной физике

Известно, что очень маленькая *водяная капля испаряется много легче, чем лужа с плоской поверхностью (или большая круглая капля). Дело здесь не только в важной роли, которую играет отношение поверхности к объему для разных капель. Известно, что большая капля или лужа, оставленные в насыщенном влагой воздухе (100% влажности), будут сохраняться, в то время как крошечная капля испарится.*

а) Покажите на эскизе испарение молекулы с ОЧЕНЬ *маленькой круглой капли и сообразите, почему молекула в этом случае может улетучиваться особенно легко.* (Намек: *молекулы воды притягиваются друг к другу — это проявляется в поверхностном натяжении,— но это притяжение действует только на коротком расстоянии в несколько молекулярных диаметров. Это ограничение проявляется в том, что пленки нефти и т. п. имеют одинаковое поверхностное натяжение независимо от того, являются ли они толстыми, тонкими или очень тонкими,— только предельно тонкие пленки имеют меньшее поверхностное натяжение.)*

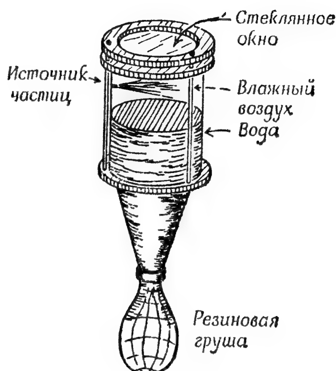
б) После этого угадайте причину, по которой облако водяных капель с трудом образуется даже в пересыщенном воздухе. (Намек: *каждая дождевая капля должна начинаться, как...?)*

в) Обычный пыльный воздух содержит частицы пыли, к которым вода может легко прилипать. Хотя частицы и кажутся микроскопическими, они все же велики по сравнению с крошечными водяными каплями. Почему туман легче образуется в пересыщенном пылью воздухе?

г) Образец влажного пыльного воздуха помещен в цилиндр с подвижным поршнем. Поршень быстро выдергивается, и воздух расширяется. Почему об-

разуется туман? (Заметим, что холодный воздух насыщается меньшим количеством водяных паров, чем теплый.)

д) *Пыль способна формировать водяные капли; однако и в воздухе, свободном от пыли, капли могут образоваться в присутствии электрически заряженных молекул или атомов (=«ионов»). (Очевидно, что молекулы воды будут притягиваться к электрически заряженным объектам. Молекулы воды можно представить в виде продолговатых тел с «+» зарядом на одном конце и «—» зарядом на другом. Можно также представить, что внешнее поле легко деформирует молекулы, придавая им указанную выше «форму»,*



Фиг. 35. К задаче 1. Простейшая камера Вильсона.

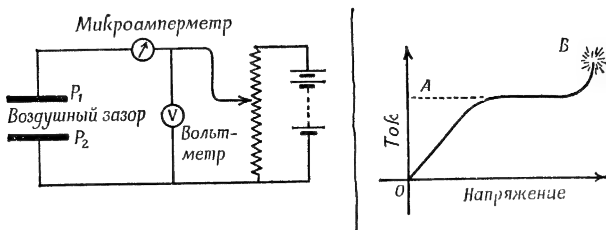
подобно тому как магнит превращает мягкое железо в постоянный магнит.) Объясните, почему водяные капли легко образуются на ионах, несущих «+» или «—» заряд?

е) *Мы полагаем, что атомы имеют электроны, которые можно отделять. Некоторые атомы легко теряют электрон; другие атомы легко захватывают электрон. (После потери или приобретения электронов атомы становятся «ионами».) Обычный воздух не проводит тока, но воздух становится проводником, когда в нем возникает пламя или когда через него проходят альфа-, бета-, гамма- или рентгеновские лучи. Некоторые из этих лучей представляют собой движущиеся* заряженные частицы, *которые оставляют след из заряженных ионов, когда они пролетают в воздухе (трек). Подобные высокоскоростные «пули» движутся слишком быстро, чтобы собирать воду на себе. Если мы хотим увидеть треки их во влажном воздухе, он должен подвергнуться быстрому охлаждению. Объясните, почему треки могут стать видимыми.*

ж) *Прибор, который позволяет наблюдать треки «ядерных пуль» визуально, называется камерой Вильсона. В простейшем виде камера Вильсона представляет собой стеклянный цилиндр, содержащий влажный воздух над поршнем из воды, управляемым сжатием резиновой груши. Объясните, почему следующая процедура сделает треки видимыми: 1) сжатие резиновой груши, 2) выдержка в течение некоторого времени, 3) быстрое отпускание резиновой груши; при этом появятся треки в виде линий из капелек воды.*

Задача 2. [*Эта задача о ионах (носителях) в газах. Они подобны ионам, которые дают красное свечение в неоновых трубках, используются в счетчиках Гейгера, вызывают электрические искры. Ответы старайтесь обосновать.*]

Если в простой цепи с батареей имеется воздушный зазор, постоянный ток в цепи протекать не будет, так как воздух является изолятором — он имеет «бесконечно большое сопротивление». Однако если в зазор введено пламя, в цепи пробегает очень маленький ток. (Все токи в этой задаче являются ОЧЕНЬ *маленькими, например 10^{-12} а.)*



Фиг. 36А. К задаче 2.

Если ввести в воздушный зазор или поместить вблизи него небольшое количество соединений радия, также потечет небольшой ток. Этот ток не приходит из *пламени или радия. Ток появляется, когда воздух становится слабо проводящим.*

а) О чем это говорит, что могло случиться с (некоторыми) молекулами?

Если препарат радия оставить у зазора, ток будет постоянным. Если теперь увеличить напряжение (с помощью делителя напряжения или увеличения числа батарей), ток пропорционально увеличится (закон Ома) до определенной величины. При еще больших напряжениях ток достигнет постоянного значения А, которое будет сохраняться в широкой области напряжений.

б) Что, по-вашему, случается на стадии А?

При значительно более высоких напряжениях ток быстро возрастает (участок В), и вскоре образуется искра.

в) Что, по-вашему, происходит на стадии В, когда батарея создает очень сильное электрическое поле в воздухе?

г) (ТРУДНЫЙ). *Если давление воздуха уменьшить наполовину (плотность упадет вдвое, и длина свободного пробега удвоится), какие изменения, по-вашему, произойдут в графике и почему?*

Задача 3

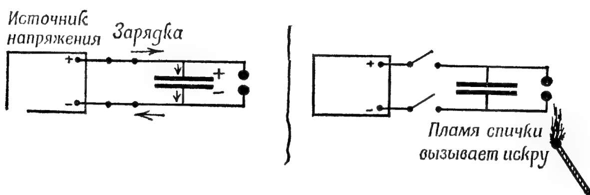
Если мы создадим очень большое электрическое поле, например, между двумя металлическими шариками, между ними проскочит искра.

а) Во время проскакивания искры протекает ток в цепи какого-то источника, который используется, чтобы зарядить шарики. Какие вещества несет этот ток в искре?

б) Если искровой разряд начался, он обычно продолжается, пока источник напряжения в состоянии поддерживать ток. Другими словами, если первая искра проскочила, следующие искры, как кажется, идут по проторенному пути. Объясните это.

в) Если напряжение между шариками настолько велико, что вот-вот может проскочить искра, но еще не проскакивает, туман или пламя спички часто могут вызвать появление искры. Почему?

г) Вместо пламени спички [в задаче в)] маленький кусочек радия, поднесенный к зазору, может вызвать искру. Почему?



Фиг. 36Б. К задаче 3,д).

д) Предположите, что оба шарика подсоединены к большой емкости. Емкость заряжается, а затем источник заряда отключается еще до начала искры. Искра образуется от зажженной спички. Искра с треском проскочит и иссякнет. Почему искра не будет повторяться в этом случае? (Утверждение «искра вытекла из ионов» не может считаться ответом.)

Задача 4

Когда электрический заряд подводится к проводнику неправильной формы, заряд распределяется неравномерно по всей поверхности (см. гл. 33).

а) На какой части поверхности плотность заряда будет больше и соответственно больше напряженность поля у поверхности образца?

б) В счетчике Гейгера одним из электродов является очень тонкая проволока, помещенная в центре трубки. Подумайте над причиной такого конструктивного исполнения.

Задача 5

Как известно, альфа-частицы являются заряженными атомами гелия.

а) Отклонения в магнитном и электрическом полях показывают, что они имеют значения e/M, вдвое меньшие, чем для ионов водорода. «Химические» свойства гелия с очевидностью говорят нам, что масса атомов гелия в 4 раза больше массы атомов водорода. Таким образом, вместо того чтобы говорить, что альфа-частица имеет $^1/_2$ (e/M) по сравнению с водородом, мы можем сказать, что она имеет отношение заряда к массе $2e/4m$, и считать, что ее заряд равен $2e$, удвоенному заряду электрона.

б) Используя счетчик Гейгера, можно сосчитать число альфа-частиц, испускаемых маленьким образцом радия за определенное время.

в) С другой стороны, можно выстрелить таким же потоком альфа-частиц (в вакууме) в маленькую металлическую коробку, собрать заряд за то же время и измерить его (или же измерить ничтожный ток, который будет протекать при соединении коробки с землей).

1) Какую важную часть информации об атомах можно получить, сопоставляя результаты измерений б) и в)? (Заметим, что б) и в) относятся к одинаковому потоку альфа-частиц.)

2) Какую дальнейшую информацию об атомах можно получить, объединяя наблюдение и обсуждение пункта а) с ответом на предыдущий вопрос ?

ГЛАВА 39 • РАДИОАКТИВНОСТЬ И ИНСТРУМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

1892 Хотя никто и не может утверждать, что будущее физической науки не содержит в запасе чудес, даже более удивительных, чем прошлое, кажется вероятным, что большинство фундаментальных принципов уже хорошо известно и что дальнейшее развитие будет состоять в корректном применении этих принципов ко всем явлениям, с которыми мы будем сталкиваться... Один выдающийся физик заметил, что будущие истины физической науки видны в шестом знаке после запятой.

А. А. Майкельсон

(Профессор физики, институт Кейса, университет Кларка, Чикагский университет)

1909 Новые открытия, сделанные в физике за последние несколько лет, идеи и возможности, подсказываемые ими, оказали на ученых влияние, подобное воздействию Ренессанса на литературу... На пути вздымаются еще более высокие вершины, и они покорятся каждому, кто поднимается на них пока еще широкими дорогами...

Дж. Дж. Томсон

(Профессор экспериментальной физики Кавендишской лаборатории, Кембриджский университет)

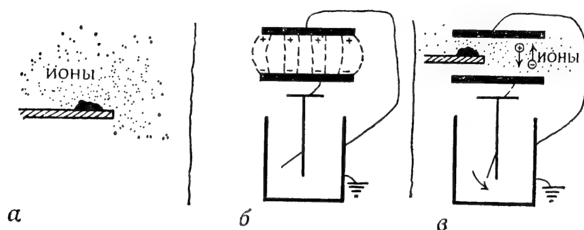
иногда мирное семейное благополучие нарушается независимыми обстоятельствами, и анализ всех нарушений, вместе взятых, позволяет выявить их причину. Точно так же открытие радиоактивности и связанных с ней рентгеновских лучей, катодных лучей, фотоэлектронов и других ионов возбудило определенные подозрения, а затем привело к познанию внутренней структуры атомов.

Радиоактивность продемонстрировала нам, что из сокровенных глубин атомов выбрасываются их осколки; она показала, что некоторые атомы нестабильны и не сохраняются неизменными. Она выявила родство одних элементов с другими и обнаружила *трансмутацию*, превращение одного элемента в другой, дала нам в руки снаряды для исследования структуры всех атомов. Более того, экспериментируя с радиоактивными материалами, мы разработали

инструменты, получившие широчайшее применение в современной физике: камеру Вильсона, счетчик Гейгера и другие приборы, которые регистрируют отдельные атомные частицы.

Ионизующее излучение

При открытии радиоактивности, незадолго до начала нашего века, интерес был прикован к воздействию излучений на заряженные электроскопы и на фотопленки. Электроскопы теряют свой заряд, когда радиоактивные вещества помещаются вблизи них; а на фотопластинках после проявления возникают темные пятна, как при облучении пластинок светом[1].



Фиг. 37. Радиоактивность и ионизация.

а — радиоактивный материал создает ионы в окружающем воздухе; *б*, *в* — заряженный электроскоп разряжается, если вблизи него помещен радиоактивный материал.

Когда радиоактивные химические элементы (уран, радий и др.) были выделены, их излучения стали еще сильнее, в некоторых случаях даже окружающий их воздух светился. Ясно — *эти вещества излучают что-то, что образует ионы* в воздухе или в фотографической эмульсии. Первым проявлением радиоактивности

---

[1] Именно так была открыта радиоактивность, вскоре после рентгеновского излучения, в поиске других проникающих излучений, которые создают вуаль на фотопластинке. Уран, помещенный вблизи пластинки на несколько часов, оставлял метку даже в том случае, когда пластинка была завернута в толстую черную бумагу. Части пластинки, прилегающие к образцу, обогащенному ураном, оказывались черными, а части, защищенные металлическими экранами, оставались светлыми. Такие радиоавтографы получают сегодня выдерживанием фотопленки в контакте с биологическими образцами, содержащими «метки» какого-нибудь радиоактивного элемента. Например, радиоактивный фосфор P^{32}, добавленный в пищу животных, пометит растущие зубы. Приготовив срез зуба несколько дней спустя после приема P^{32} и поместив его в соприкосновение с фотопленкой, мы получим радиоавтограф.

была способность к ионизации. «Количество радиоактивности» измерялось по произведенной ионизации [1].

Казалось, что ионы производятся чем-то, что испускается непосредственно веществом; эти ионизующие агенты были названы «лучами». (Мы знаем теперь, что лучи образуют ионы, отрывая электроны от атомов на своем пути.)

Опыты с пластинками, поглощающими излучение, указывали на три вида лучей, различающихся по поглощению в веществе:

α) Сильно ионизующие лучи, которые проходили *только* 2,5—5 *см* в воздухе по прямой. Эти лучи были названы *α-лучами* (а впоследствии α-частицами). Лист толстой бумаги задерживал их, но они проходили через папиросную бумагу или через несколько листочков фольги из золота.

β) Лучи, которые проходили бо́льшее расстояние, в воздухе $\sim$30,54 *см*, многослойную стопку бумаги, несколько миллиметров легкого металла. Их ионизующее действие ощущалось на расстояниях в воздухе, в десятки раз больших, чем для α-лучей, но их траектория не была столь прямолинейной. Они были названы *β-лучами.*

γ) Лучи, которые распространялись намного дальше, легко проходили расстояние в воздухе в несколько метров (с ослаблением интенсивности по закону обратных квадратов, вызванным расхождением пучка лучей с увеличением расстояния), расстояние в свинце в несколько сантиметров (с *экспоненциальным* поглощением; каждый сантиметр свинца «срезает» одинаковую долю интенсивности). Эти лучи, вскоре идентифицированные как электромагнитное излучение, подобное рентгеновскому, были названы *γ-лучами.*

Узкая трубка с небольшим количеством радия представляла собой «пушку», которая выстреливала пучок лучей. В вакууме все типы лучей распространялись по прямолинейным траекториям на неопределенно большие расстояния.

Сначала были загадочными и природа этих «лучей», и источник их возникновения. Затем тяжелые металлы уран и торий были выделены из руд и было найдено, что лучи исходят от металлов, а не от кислорода, кремния и других элементов, содержащихся в

[1] Мы до сих пор используем электроскопы для оценки мощных источников излучения, измеряя скорость образования ими ионов. Маленькие электроскопы, по внешнему виду напоминающие авторучки, использовались для контроля радиационной безопасности. Счетчики Гейгера впоследствии заняли место электроскопов при измерении слабых источников или при точных измерениях.

рудах. Эти тяжелые металлы были сильными источниками лучей. Радий, открытый при химической переработке, сильнейший излучатель, оказался еще одним тяжелым металлом.

Лучи и заряды

Электрический заряд, который несут «лучи», был исследован собиранием лучей в металлический стакан в вакууме. Оказалось, что α-частицы несут положительный заряд; β-частицы — отрицательный заряд, γ-лучи не несут заряда.

Отдельные α-частицы могли быть сосчитаны тренированным наблюдателем, замечающим крошечные световые вспышки, которые возникают при столкновении α-частиц с экраном, покрытым минералом. Такие подсчеты дали очень важные сведения об атоме (см. задачу 5, а также гл. 40).

Мы теперь знаем, что эти лучи исходят из самой середины атомов — их ядер. Вы увидите, как эти лучи идентифицируются, измеряются и используются. Но сначала взгляните на действительную картину их полета. Она отображена на изумительных фотографиях, дающих самые наглядные результаты во всей атомной физике. Эти фотографии подобны тем, которые дают присяжным заседателям в суде более ясные показания, чем дюжина устных свидетельств.

Картины в камере Вильсона

Как можем мы сфотографировать полет одиночной атомной частицы, к тому же очень быстрой? Прямая фотография невозможна — частица очень мала и летит слишком быстро. Но мы можем получить картину ее полета, рассматривая разрушения, производимые частицей на своем пути. Вот пример, предложенный профессором Андраде. Выстрелим пушечным ядром вдоль поверхности поля, на котором растет пшеница, и попытаемся сфотографировать его траекторию с самолета. Ядро пролетело до того, как была сделана фотография; после его полета нельзя различить разбитые колосья, но через небольшое время вы сможете сфотографировать темную линию, созданную черными дроздами, слетевшимися клевать упавшие зерна. Лучи от источников радиации оставляют беспорядочные скопления ионов в воздухе, через который они проходят. Следы ионов можно сделать видимыми, если на ионах будут конденсироваться маленькие капельки воды. Возникающую тонкую линию из капелек можно рассмотреть или сфотографировать,

Это атомный вариант создания облачного следа, оставляемого в небесах струей газов, выбрасываемых двигателем самолета.

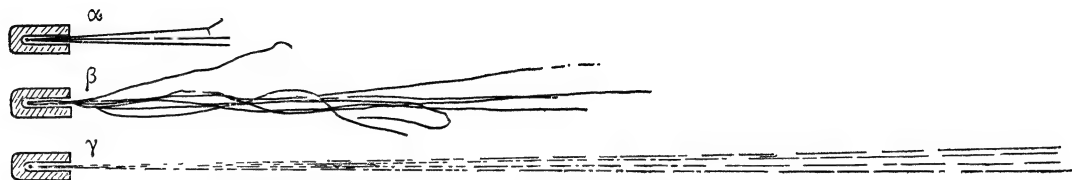
Приспособление для получения видимых траекторий атомных частиц было изобретено и усовершенствовано Ч. Т. Р. Вильсоном. Камера Вильсона позволяет нам видеть и фотографировать пути отдельных частиц, летящих через воздух,— электронов, альфа-частиц или более тяжелых ядер, которые являются составными частями атомов. Мы можем, следовательно, «видеть» отдельные атомные события: столкновения, превращения, взрывы...

Работа камеры Вильсона

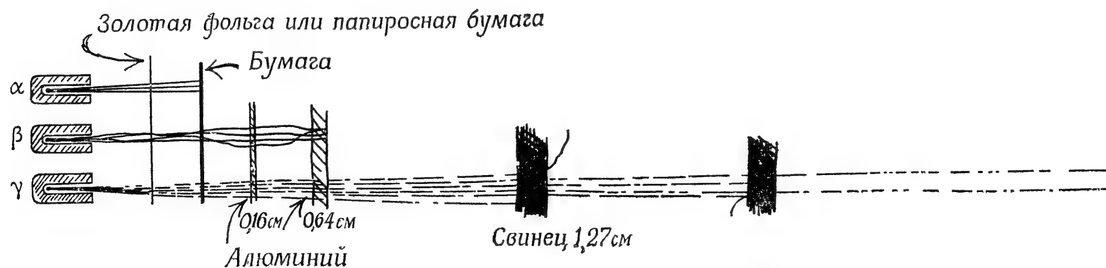
Когда вода конденсируется, образуя капли или обыкновенный туман, каждая капля образуется на частице пыли, которая является как бы зародышем [1]. Капли тумана будут вырастать из предельно маленьких капелек, образованных из случайно собравшихся нескольких молекул воды. Подобные комплексы могут чрезвычайно легко испаряться; фактически они никогда не образуются в отсутствие специального инициатора. Большая кривизна поверхности крошечной капли делает испарение очень легким. Маленькие капли не будут образовываться в воздухе, насыщенном водяными парами, но большие капли будут образовываться на больших частичках пыли, покрытых водой. (В масштабе нашего рассмотрения на молекулярном уровне капелька или частица пыли, которая настолько велика, что уже может быть видимой, является *большой*.)

Воздух, который содержит немного водяного пара и является лишь чуть влажным, имеет низкую относительную влажность. Если добавлять все больше и больше водяного пара — воздух достигнет насыщения (относительной влажности 100%, при которой добавление водяного пара только вызывает конденсацию). Предел насыщения зависит от температуры. В жаркий день кубический метр *насыщенного* паром воздуха (1,2 *кг*) содержит около 23 *г* воды, а в холодный день — только 10 *г*. Возьмем теплый влажный и пыльный воздух и охладим его. Водяных паров станет более чем достаточно для насыщения, и они начнут конденсироваться в туман на частицах пыли, а также на стенках сосуда. Возьмем

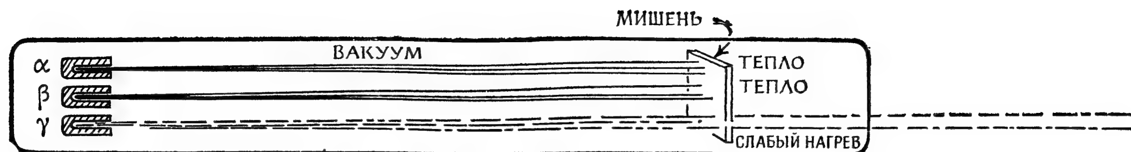
[1] Не всякая пыль будет служить для образования капель. Должен ли быть материал частиц таким, чтобы вода, попадая на частицу, образовывала с ее поверхностью большой (а может быть, маленький) краевой угол? Этот вопрос чрезвычайно важен для городов, борющихся со «смогом».



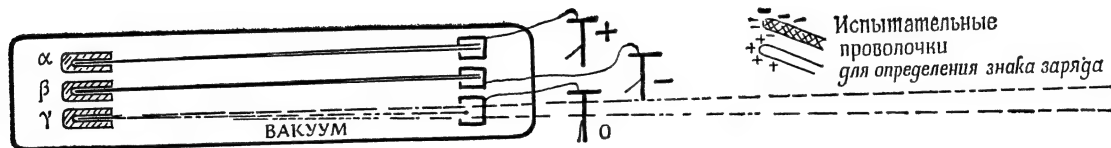
Фиг. 38. α-, β-, γ-лучи, излучаемые источником, проходят через воздух.



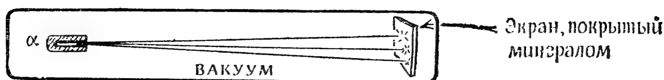
Фиг. 39. α-, β-, γ-лучи поглощаются листами различных материалов.



Фиг. 40. α-, β-, γ-*лучи беспрепятственно распространяются в вакууме, нагревают поглотивший их материал.*



Фиг. 41. α- *и* β-*лучи несут заряд,* γ-*лучи заряда не несут.*



Фиг. 42. α-лучи вызывают крошечные вспышки света, ударяясь об экран, способный давать свечение.

теплый влажный воздух, *свободный от пыли*, и быстро охладим его. В воздухе произойдут такие изменения:

теплый. . .почти насыщенный → *нет тумана, сухие стенки*

охлажденный. . .насыщенный →*вода готова конденсироваться*

охлажденный. . .пересыщенный→ *вода конденсируется на стенках, есть готовность к образованию тумана, но нет инициаторов*

еще более охлажденный. . .пересыщенный→*конденсация воды на стенках, начало образования тумана на чем угодно*(?)

Какой-нибудь ион может служить вместо частицы пыли как инициатор образования капельки тумана. Молекулы воды электрически поляризованы или становятся таковыми, попадая в электрическое поле. Ион (электрически заряженный атом или молекула) будет легко собирать вокруг себя гроздь молекул воды, давая начало капельке. Возьмем теплый влажный, свободный от пыли воздух, создадим в нем некоторое количество ионов и затем охладим его:

теплый. . .почти насыщенный

охлажденный. . .насыщенный →*вода готова конденсироваться*

охлажденный. . .пересыщенный→ *конденсация воды на стенках и конденсация воды на ионах.*

Вот как получается картина в камере Вильсона: теплый влажный, свободный от пыли воздух внезапно охлаждается, сразу же после этого через камеру простреливается ионизующий луч. Луч оставляет положительно и отрицательно заряженные ионы вдоль всего своего пути (трека), и крошечная капелька тумана конденсируется на каждом ионе. Весь трек просматривается в яр-

ком свете как линия из крошечных капель; иногда капель так много, что они выглядят сплошной линией. Внезапное охлаждение производится предоставлением возможности воздуху вытолкнуть поршень наружу. Воздух предварительно освобожден от пыли, и электрическое поле выметает прочь образовавшиеся ранее ионы. Таким образом, в камере регистрируются только треки, образованные после одной операции расширения воздуха. Вспомним, что трек выявляет разрушения, вызванные частицей, собственно *ее электрическим полем.* Водяные капли образованы ионами, которые оставлены проходящими частицами. *Ни в каких случаях водяная капля не образуется на самой быстрой частице или на ядерных мишенях, разлетающихся от соударений с ней.*

Задача 6. Камера Вильсона *(дополнение к задаче 1)*

В простейшей форме камера Вильсона представляет собой стеклянный цилиндр, содержащий влажный воздух над поршнем из воды, которая может выходить при расправлении сжатой резиновой груши (фиг. 35). Объясните, почему следующие операции делают трек видимым: 1) сжатие резиновой груши; 2) выдержка в течение некоторого времени; 3) внезапное расправление груши и появление треков. Что происходит на каждой стадии?

Треки альфа-частиц в камере Вильсона

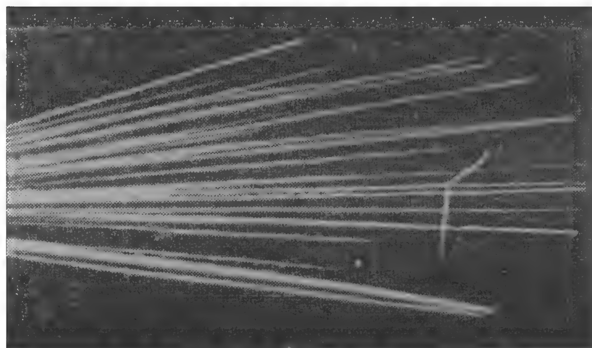
Альфа-частицы дают прямые треки в несколько сантиметров длиной, настолько усеянные водяными каплями, что они выглядят подобно миниатюрной струе из пожарного шланга. Мы можем сосчитать ионы по общему числу водяных капель или суммарным электрическим методом: 200 000 ионов в 5-сантиметровом треке. Альфа-частица выбивает электроны из 200 000 «атомов» воздуха при прохождении. Это необычное поведение: ни одного сильного столкновения, но лишь 200 000 слабых (для альфа-частицы) столкновений. Что может случиться с обычной молекулой в воздухе на таком пути? Имея длину свободного пробега 10^{-7} *м*, она должна ударить $0{,}05/10^{-7}$ соседей, испытать 500 000 прямых столкновений, делающих ее траекторию зигзагообразной.

Альфа-частица производит приблизительно такое же число столкновений — для *точечных* снарядов, обстреливающих молекулы воздуха, мы можем принять диаметр мишени, равным половине диаметра молекулы, и число столкновений в $1/4$ часть от 500 000. Но почти во всех этих столкновениях альфа-частицы идут напролом, что можно видеть, рассматривая следующие фотографии:



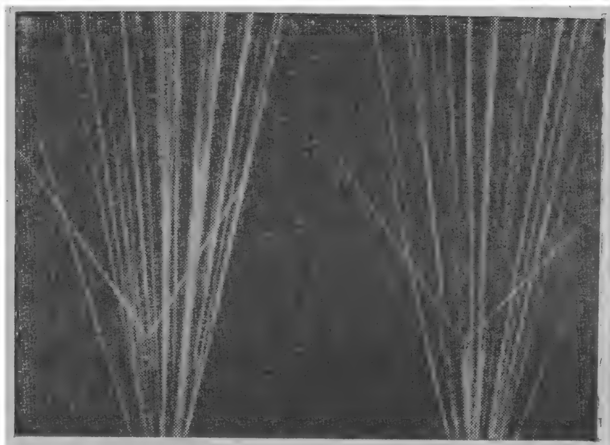
Фиг. 43. Фотография в камере Вильсона.

α-лучи от маленького источника — смеси тория C и тория C′. Заметьте, что имеются две группы α-лучей, каждая с определенным пробегом в воздухе (из книги: Rutherford, Chadwick and Ellis, Radioactive Substances and their Radiations, Cambridge Univ. Press). Источник излучения внизу фотографии.



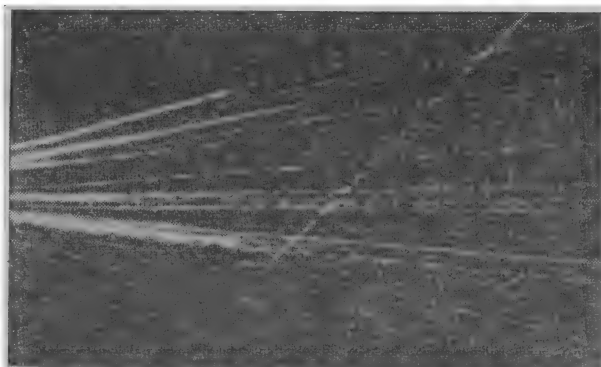
Фиг. 44. Фотография в камере Вильсона.

α-лучи во влажном азоте. Один луч претерпел столкновение с ядром азота, и трек разделился. α-частица пошла вниз. Ядро отдачи — азот — дало короткий толстый трек (P. M. S. Blackett, Proc. Roy. Soc. Lond.). Источник излучения находится слева.



Фиг. 45. Стереоскопическая фотография в камере Вильсона.

α-лучи во влажном гелии. Измерения показывают, что два луча «вилки», возникшей в результате столкновения, образуют между собой угол 90° (P. M. S. Blackett, Proc. Roy Soc. Lond.). Источник излучения внизу фотографии.



Фиг. 46. Фотография в камере Вильсона.

α-лучи во влажном водороде. Один луч претерпел столкновение с ядром водорода, которое пошло вперед и вверх, оставив более тонкий трек (P. M. S. Blackett, Proc Roy. Soc Lond.). Источник излучения находится слева.

(Инспектор Грегори):

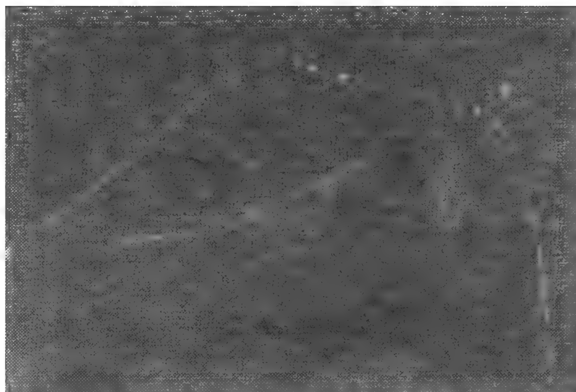
«Есть ли еще какие-то моменты, на которые вы советовали бы мне обратить внимание?»

«На странное поведение собаки в ночь преступления».

«Собака? Но она никак себя не вела!»

«Это-то и странно», — сказал Холмс[1].

Удивительное заключается в том, что альфа-частица не изменяет свой трек. Это не просто результат высокой скорости.



Фиг. 47. Фотография в камере Вильсона.
Трек β-лучей во влажном воздухе (C .T. R. Wilson, Proc. Roy Soc. Lond.). Источник излучения находится слева.

Если попытаться медленно прогнать биллиардный шар среди других таких же шаров, находящихся в покое, то он испытает много сильных столкновений. Если прогнать его *очень быстро*, то результат будет тем же самым. Только если остальные шары будут относительно легкими (шарики от пинг-понга), траектория движущегося шара будет прямой.

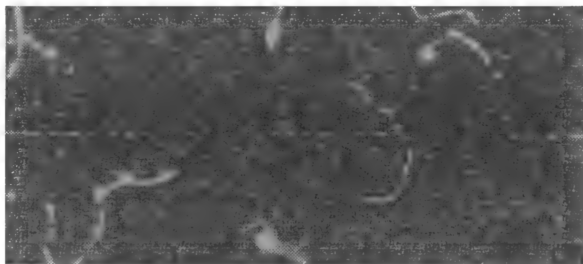
В каждом из многих малых столкновений альфа-частица «толкает» легкий электрон, без труда выбрасывая его из атома. Возникает загадка: где *остаток* каждого атома, который альфа-частица «толкнула»? Атомы массивны, и при рассмотрении остатков атомов возникают те же вопросы, что и при рассмотрении

[1] Артур Конан-Дойль, Собр. Соч. в 8 томах, изд. «Правда», Москва, 1966, т. 2, повесть «Серебряный».

альфа-частиц. Добавим, что вместо того, чтобы отклониться или даже повернуть назад, альфа-частица проходит прямо через 200 000 атомов. Следовательно, *остаток атома должен быть много меньше, чем мы думаем, так как он оказывается очень малой мишенью.* Насколько малой? Никогда ли не бывает прямых столкновений? На фотографиях иногда встречаются треки, показывающие прямые столкновения с чем-то массивным. После столкновения массивный объект также оставляет трек. Таким образом, каждая альфа-частица дает трек, обусловленный слабыми столкновениями, и имеются лишь редкие случаи треков с изломами, которые показывают прямые столкновения. В воздухе альфа-частица может даже быть отброшена назад, и тогда объект столкновения дает толстый направленный вперед трек. В гелии треки имеют форму «вилок» с характерным углом между направлениями разлетающихся частиц. В водороде альфа-частицы всегда движутся вперед, и мишень (H) также отлетает вперед, образуя более слабый трек.

Структура атома

Итак, из фотографий атомных событий мы ясно видим, что атомы в основном пусты и лишь во внешних их областях находятся легкие, подвижные электроны. Атомы должны иметь очень



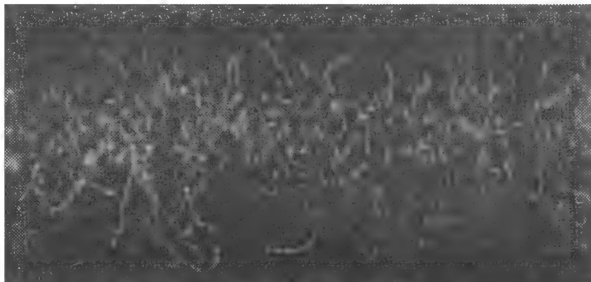
Фиг. 48. Фотография в камере Вильсона.

Треки β-лучей. Один *быстрый* β-луч пересекает камеру. Другие треки принадлежат медленным лучам (C. T. R. Wilson, Proc. Roy. Soc. Lond.). Источник излучения находится слева.

маленькие массивные ядра, содержащие бóльшую часть массы,— с ними быстрые альфа-частицы изредка сталкиваются. Измерения отклоненных треков (углы, счет водяных капель и др.) показы-

вают, что эти редкие столкновения являются упругими: *кинетическая энергия и момент сохраняются*. Сталкивающиеся тела ведут себя подобно твердым упругим биллиардным шарам.

Как и при столкновении шаров, измерения углов позволяют нам узнать относительные массы. В воздухе альфа-частица сталкивается с объектом, имеющим массу, в несколько раз большую, чем ее собственная. В гелии «вилка» всегда составляет угол 90°, из чего можно заключить, что в этом случае альфа-частица сталкивается с объектом, имеющим массу, равную ее собственной



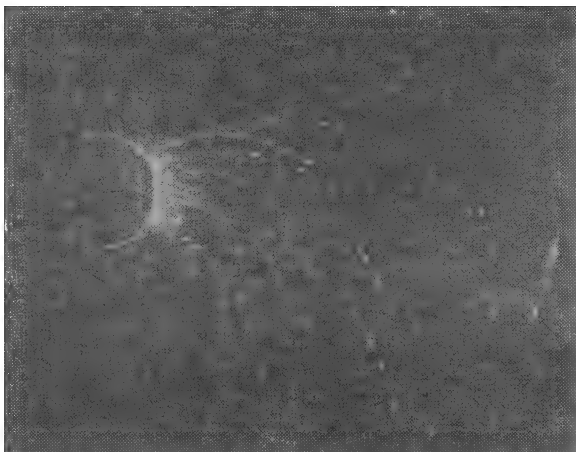
Фиг. 49. Фотография в камере Вильсона.

Электроны, выбитые из атомов пучком рентгеновских лучей, проходящих во влажном воздухе (слева направо). Пучок γ-лучей производит подобное действие, образуя меньшее количество более длинных треков (C. T. R. Wilson, Proc. Roy. Soc. Lond.).

(см. гл. 26, задача 22). Углы разлета частиц в водороде показывают, что сильные столкновения происходят с объектом, имеющим лишь $^1/_4$ массы альфа-частицы. Вспомним относительные атомные массы из химии:

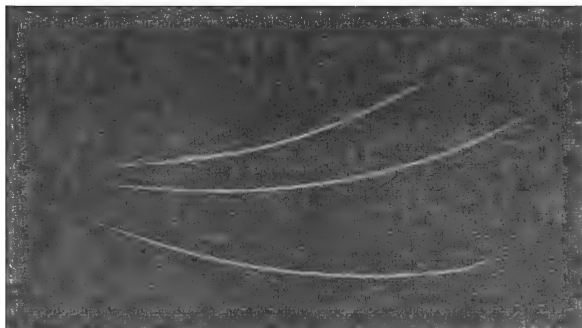
водород 1, гелий 4, азот 14, кислород 16
и электрон (в той же шкале) 1/1840.

Измерения «вилок» дают для альфа-частицы массу 4, позволяя предположить, что она ион гелия. Если это гелий, то ничего удивительного нет в таких коротких и прямых треках — тяжелый, электрически заряженный атом гелия идет напролом через воздух и срывает электроны, в 7000 раз более легкие, чем он сам.



Фиг. 50. Фотография в камере Вильсона.

β-лучи в магнитном поле. Поле не очень сильное. Радиоактивный источник находится на поверхности цилиндра — в левой части рисунка (E. C. Crittenden, Jr.).



Фиг. 51. Фотография в камере Вильсона.

α-лучи в магнитном поле. Поле очень сильное. Обратите внимание на увеличение кривизны и заметный загиб у конца траектории, где частица уже замедлена многими столкновениями (П. Л. Капица) (из книги Rutherford, Chadwick and Ellis, Radioactive Substances and their Radiations, Cambridge Univ. Press). Источник излучения находится слева.

Треки бета-лучей

Посмотрите на фотографию бета-лучей, проходящих во влажном воздухе. Длинные разбросанные треки с отдельными ионами здесь и там и с множеством искривлений. Картина ясная: быстрый электрон пролетает среди других электронов той же массы, находящихся во власти всех локальных электрических полей.

Треки гамма-лучей

Поток гамма-лучей сам по себе не дает видимых треков. Гамма-луч обычно идет прямо, подобно свету, проходящему через стекло, не оказывая никакого воздействия на вещество. Иногда он выбивает электрон, который освобождается с малой энергией отдачи. В конце концов гамма-луч встречает некоторый электрон в атоме, который он выбрасывает, передавая ему всю свою энергию. Такие электроны, излучаемые приблизительно во все стороны от пучка, дают разбросанные во все стороны треки, подобные трекам бета-лучей.

Разделение «лучей» электрическим и магнитным полями

Прежде чем изображения в камере Вильсона получили четкое объяснение, потоки «лучей» были проанализированы пропусканием их в вакууме через электрическое и магнитное поля. Отклонения в электрическом поле пропорциональны e/mv^2; в магнитном поле отклонения пропорциональны e/mv; сопоставление результатов позволяет найти v и e/m:

α) Альфа-частицы имеют положительный заряд;
имеют e/M, составляющее ровно половину от e/M для водородных ионов, H^+;
излучаются с различными скоростями вплоть до 16 000 *км/сек.*

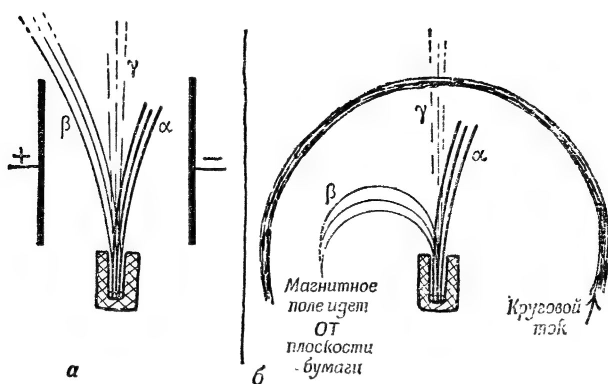
β) Бета-частицы имеют отрицательный заряд;
имеют такое же отношение e/m, как электроны, эмиттируемые из нагретых нитей [1], и т. д. Это *действительно* электроны;
излучаются с высокими скоростями вплоть до 294 000 *км/сек* (98% скорости света).

---

[1] Это справедливо для медленных электронов. При очень высоких скоростях e/m у электронов аномально мало — это пример релятивистского изменения массы.

γ) Гамма-лучи не имеют заряда; движутся прямо вперед, на них не воздействуют поля.

Таким образом, α- и β-лучи — это ускоренные частицы.



Фиг. 52. Наглядные диаграммы, показывающие траектории α-, β- и γ-лучей.

а — в электрическом поле, б — в магнитном поле. в магнитном поле α-лучи изгибаются намного меньше, чем в электрическом (примерно в 100 раз).

Гамма-лучи

Гамма-лучи ведут себя подобно очень коротковолновым рентгеновским лучам. Они испытывают дифракцию в кристалле — регулярно расположенные атомные слои в кристалле действуют, как микроскопическая дифракционная решетка. Они перемещаются со скоростью света и могут выбивать электроны из всех видов материи, т. е. обладают гигантским фотоэлектрическим действием.

Идентификация альфа-частиц

Ряд очевидных результатов указывает, что α-частица является дважды ионизованным атомом гелия He^{++}: углы при столкновениях, сопоставление числа частиц и собранного заряда, измерение e/M. Резерфорд и Ройдс подтвердили эти результаты, собирая альфа-частицы, и доказали, что собранные альфа-частицы образуют гелий. Образец газа радона (дочерний продукт радия), излучающий альфа-частицы, был запаян в стеклянную трубку с очень тонкими стенками. Некоторые альфа-частицы, излучаемые радо-

ном, проходили через тонкую стенку в наружную трубку. Пропускание через эту трубку искры позволяло наблюдать желтое свечение возрастающей интенсивности. Это свечение было характерным для гелия. С помощью дополнительных испытаний убедились в том, что гелий не мог натекать в трубку из воздуха.

Происхождение радиоактивности

Должны происходить бурные события, чтобы электроны вылетали из атомов со скоростями, близкими к скорости света; гелий с «++» зарядами выстреливался из других атомов с огромной скоростью. Эти частицы не могут быть продуктами обычных химических или физических взаимодействий, подобно CO_2, который выделяется из мела или идет пузырями из содовой воды. Когда радий и уран участвуют в химических превращениях, радиоактивность всегда их сопровождает. Не из этих ли материнских ядер вылетают частицы? Для ответа на этот вопрос необходимы представления о строении атома; альфа-частицы как исследовательские снаряды сами помогают создавать такие представления. Мы рассмотрим этот вопрос в гл. 40.

Радиоактивность и химия

Превращения радиоактивных атомов сами по себе открывают большой простор для исследований. В начале 1900-х годов физики и химики объединились для исследования химической природы радиоактивных элементов. Уран, радий и другие радиоактивные элементы не только излучают ионизующие лучи, но *при этом полностью изменяют свою химическую природу*. Они оказываются способными, будучи сначала одним химическим элементом, затем превращаться в другой химический элемент. Радий является металлом с большой плотностью и химическими свойствами, близкими к свойствам бария и кальция. Радий излучает альфа-частицы и медленно исчезает. Вместо него появляется новый элемент, тяжелый, совершенно инертный газ, сейчас называемый радоном. Этот газ принадлежит к семейству гелия, неона ... — все они инертны, не вступают в химические взаимодействия. Мы знаем теперь, что, когда одиночный атом радия претерпевает «радиоактивный распад», он излучает одну альфа-частицу и становится атомом радона.

Атом радия, следовательно, является чем-то нестабильным. Купите стерженек радия и попытайтесь сохранить его. Только

половина его останется 1600 лет спустя радием. Вероятность для отдельного атома радия распасться[1] в следующие 1600 лет составит 50% и т. д. Его дочерний атом радон является гораздо более нестабильным. Вероятность его распада наполовину составляет 4 дня. Этот четырехдневный период есть *период полураспада* радона. Попытайтесь сохранить образец чистого газообразного радона, и четыре дня спустя вы обнаружите, что половина его исчезнет, превратившись в твердые элементы. Давление газа упадет наполовину. Сохраняйте его еще четыре дня, и половина остатка исчезнет, и т. д.

Пока атом радия еще является таковым, т. е. до момента, когда он взорвется, он имеет постоянные химические свойства определенного элемента, занимающего определенное место в периодической системе элементов. Когда атом радия излучает альфа-частицу, появляется новый атом — радон, который имеет другие свойства и переходит в другую клетку периодической системы. Он остается там до тех пор, пока в свою очередь не распадется. Новый атом является соответствующим элементом, опять нестабильным. Радон излучает альфа-частицу и становится «радием А» с 3-минутным периодом полураспада — «радий А» еще более нестабилен, чем радон. «Генеалотическое древо» продолжается через ряд нестабильных элементов. Некоторые из них излучают альфа-частицы, некоторые излучают бета-лучи. «Древо» заканчивается «радием G», который является одной из форм обычного, стабильного свинца. Таким образом, радиоактивность не только снабжает нас нужными снарядами, она также с очевидностью показывает, как один химический элемент спонтанно превращается в другой — естественную *трансмутацию* (превращение) элементов, не зависимую от человека (и, как казалось вначале, не контролируемую человеком). Приведенное в таблице «генеалогическое древо» показывает ряд радия от урана до свинца. (Действительное древо более сложное: есть боковые ветви, которые присоединяются к главной цепи. Имеется несколько других подобных же семейств, идущих более или менее параллельно, от начала, подобного урану, и оканчивающихся свинцом.)

В наши дни бомбардировкой стабильных атомов почти всех элементов частицами высоких энергий из больших ускорителей

---

[1] Как нам описывать изменения? Будем ли мы говорить, что атомы радия *исчезают*, или *изменяются*, или *разлагаются*, или *разламываются*, или *взрываются*, или *распадаются*? «Исчезают» — термин, который может ввести в заблуждение, «изменяются» — слишком неопределенный. Остальные четыре выражения можно употреблять.

мы можем производить новые радиоактивные элементы каждый со своим «генеалогическим древом», хотя во многих случаях имеются только одна или две стадии, которыми превращения заканчиваются на стабильном атоме. Некоторые из новых радиоактивных элементов занимают место за ураном в периодической системе, например плутоний. Он распадается (совершая переходы, подобные описанным выше) на другие атомы вдоль «генеалогического древа», которое проходит сверху вниз через уран, подобно семейству радия. Таким

«Генеалогическое древо» семейства урана — радия

Элемент	Символ: старое обозначение	Символ: новое обозначение	Изотоп элемента	Излучаемая частица	Период полураспада
Уран I	$_{92}U^{238}$		Уран	α	$4{,}5 \cdot 10^9$ лет
Уран X_1	$_{90}UX_1^{234}$	$_{90}Th^{234}$	Торий	β, γ	24 дня
Уран X_2	$_{91}UX_2^{234}$	$_{91}Pa^{234}$	Протактиний	β, γ	1,2 мин
Уран II	$_{92}U_{II}^{234}$	$_{92}U^{234}$	Уран	α	$2{,}5 \cdot 10^5$ лет
Ионий	$_{90}Io^{230}$	$_{90}Th^{230}$	Торий	α, γ	$8 \cdot 10^4$ лет
Радий	$_{88}Ra^{226}$		Радий	α, γ	1620 лет
Радон	$_{86}Rn^{222}$		Радон	α	3,82 дня
Радий A	$_{84}Ra{-}A^{218}$	$_{84}Po^{218}$	Полоний	α	3 мин
Радий B	$_{82}Ra{-}B^{214}$	$_{82}Pb^{214}$	Свинец	β, γ	27 мин
Радий C	$_{83}Ra{-}C^{214}$	$_{83}Bi^{214}$	Висмут	β, γ	19 мин
Радий C′	$_{84}Ra{-}C'^{214}$	$_{84}Po^{214}$	Полоний	α	0,00016 сек.
Радий D	$_{82}Ra{-}D^{210}$	$_{82}Pb^{210}$	Свинец	β, γ	22 года
Радий E	$_{83}Ra{-}E^{210}$	$_{83}Bi^{210}$	Висмут	β	5 дней
Радий F	$_{84}Ra{-}F^{210}$	$_{84}Po^{210}$	Полоний	α, γ	138 дней
Радий G (свинец)	$_{82}Ra{-}G^{206}$	$_{82}Pb^{206}$	Свинец	—	Стабильный

образом. «генеалогическое древо» радия типично и для старых радиоактивных семейств, встречающихся в природе, и для многих новых семейств, начинающихся с элементов, которые мы производим при облучении.

В таблице, где показано «генеалогическое древо», символы, подобные Ra—E, — старые, относящиеся к ранним химическим разделениям радиоактивных веществ. Атомы представлены дочерями, внучками и т. д. радия. Хотя они имеют совершенно различные химические свойства, они все носят фамильное имя радия. Теперь, при огромном изобилии радиоактивных атомов, естественных и искусственных, мы предпочитаем обозначать их стандартными символами химических элементов. Например, радий B химически идентичен свинцу, и мы обозначаем его Pb (свинец — *plumbum* по-латыни). При описании радиоактивных превращений мы обычно даем дополнительную информацию к символу. Мы называем радий $B_{82}Pb^{214}$. Индекс 82 — «атомный номер» элемента, порядковый номер элемента в периодической системе. все *разновидности свинца имеют номер 82.* Индекс 214 — «массовое число» атома — *округленное значение* массы атома в шкале, где масса водорода принята за 1. Разные изотопы свинца имеют разные атомные веса. Значение 214 — аномально высокое для свинца и позволяет ожидать нестабильности, вызванной переполнением ядра частицами.

В химии радиоактивных атомов нет ничего необычного, за исключением предельно малых количеств их, которые могут быть обнаружены и точно измерены по радиоактивности. Смешаем некоторое количество радия B с обычным свинцом как «носителем» и мы никогда не разделим их химически до тех пор, пока сам радий B сохраняется. Расплавим смесь: радиоактивность, обусловленная радием B, сохраняется. Растворим смесь в азотной кислоте и выкристаллизуем нитрат свинца: нитрат свинца берет с собой всю радиоактивность. Смешаем кристаллы с другими солями (калия, алюминия, вольфрама...), затем проведем анализ на свинец: вся радиоактивность выделяется со свинцом. Однако мы должны поспешить проводить эти химические эксперименты, так как радий B распадается с периодом полураспада 27 *мин* в радиоактивный висмут. Проводя химические операции медленно, мы будем находить все меньше радиоактивности, сопровождающей свинец, и все больше радиоактивности, связанной с висмутом. После получаса половина исходной радиоактивности *свинца* исчезнет.

Радий B и радий C — два изотопа свинца. По химическим и обычным физическим свойствам они *являются* свинцом; но один нестабилен с 27-минутным периодом полураспада, а другой ста-

билен. Мы называем второй «естественным» свинцом только потому, что человек нашел его раньше, и сейчас он встречается намного чаще, чем нестабильный. Если мы теперь просмотрим все химические элементы, то увидим, что каждй элемент имеет несколько изотопов. Некоторые из них стабильны (разделяются в масс-спектрографе), а некоторые нестабильны (получены с помощью циклотронов и т. п.). Мы также находим небольшое количество нестабильных изотопов в природе — в виде естественных радиоактивных элементов.

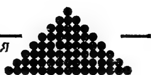
Изменения атомного номера и атомного веса

Альфа-частица выносит из атома массу, равную 4, и, таким образом, мы должны ожидать, что атомный вес дочернего атома будет меньше атомного веса материнского атома, излучающего альфа-частицу, на 4. Прямое химическое взвешивание показывает, что радий имеет атомный вес 226. Следовательно, его дочерний атом должен иметь атомный вес 226—4, т. е. 222. Это предсказание было проверено измерением плотности газа радона [1]. Результат: атомный вес очень близок к 222. При излучении β-луча атомный вес не должен изменяться. Ядро излучает электрон, но дочерний атом нуждается в одном *внешнем* электроне и берет его у соседей. Масса электрона очень мала и составляет, как известно, 1/7000 от массы альфа-частицы.

Когда атом излучает альфа-частицу (α^{++} или He^{++}, или $_2He^4$), он перескакивает в новую клетку периодической системы, на две клетки левее, изменяя атомный номер на две единицы. Когда мы будем обсуждать теорию строения атома, вы получите объяснение этого.

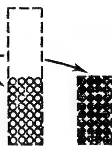
Когда атом излучает β-луч (β^- или e^-), он перескакивает на один атомный номер гправо. Существует много новых нестабильных атомов, получаемых при протонной бомбардировке. Они излучают позитроны (β^+) и должны перескакивать влево на один атомный номер.

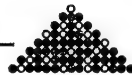
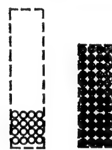
[1] Закон Авогадро гласит, что кубический метр одного газа содержит такое же количество молекул, как и кубический метр другого газа (при одинаковых температуре и давлении). Следовательно, при сравнении двух газов *отношение плотностей=отношение масс одинакового числа молекул=отношение масс отдельных молекул.* Для радона, имеющего одноатомную молекулу с массой 222, мы будем ожидать плотность в 111 раз большую, чем для водорода H_2, молекула которого имеет массу 2. Эксперимент дает для радона плотность в 111,5 раза большую. Это совпадение чрезвычайно хорошее, если иметь в виду трудности измерений, проводимых с быстро распадающимся образцом.

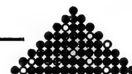
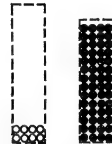


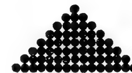
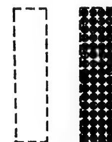






Фиг. 54. Радиоактивный распад.

Период полураспада. Чисто случайный характер радиоактивности

Радиоактивные атомы не могут быть старше или моложе, подобно людям. Группа людей, родившихся одновременно, через A лет после рождения уменьшается наполовину — 50% остается в живых и 50% умирает. Кажется, что здесь проявляется период полураспада в A лет, однако оставшаяся через A лет половина группы не будет просто уменьшаться наполовину за следующие A лет. Возьмите образец радиоактивного элемента с периодом полураспада 4 дня. После 4 дней половина его атомов останется неизмененной, с надеждой на будущее — как всегда. После следующих 4 дней половина этого остатка останется неизмененной, снова с надеждой на будущее, и т. д. Начнем с 1 000 000 атомов. После 4 дней от начала останется 500 000, после 8 дней — 250 000, после 12 дней — 125 000 и т. д. Это выглядит как результат действия чисто случайной причины. Если выделить какой-то атом, то независимо от его возраста можно держать пари 50 : 50 «за» и «против» его распада в следующие 4 дня. Каждый тип радиоактивного атома имеет постоянную вероятность распада в следующую секунду времени [1].

Современная теория указывает, что чем больше вероятность распада (короче период полураспада), тем больше должна быть энергия, освобождающаяся в атоме и выносимая из него альфа-частицами и т. п.

Счетчики

Как мы измеряем количество радиоактивного материала? Откуда мы знаем, что он имеет постоянный период полураспада? Конечно, не прямым взвешиванием или другими химическими средствами — очень уж малы образцы. Мы измеряем образцы по ионизации, которую они производят. Если один образец производит вдвое больше ионов в секунду, чем другой из того же материала, мы заключаем, что он вдвое больше по величине, содержит вдвое больше атомов. Мы можем так утверждать, потому что полагаем, что атомы имеют одинаковую вероятность распада. При этом дву-

---

[1] Некоторым философам науки на вопрос, откуда мы знаем, что время течет равномерно, и почему мы уверены, что идентичные периоды хорошего маятника происходят за равные времена, можно ответить, что мы вправе принять постоянный период полураспада некоторого радиоактивного материала как некую аксиому и затем основывать измерение времени на распаде этого материала.

кратная скорость распадов (измеренная по ионам, произведенным испущенными лучами) означает двукратное количество нераспавшихся атомов.

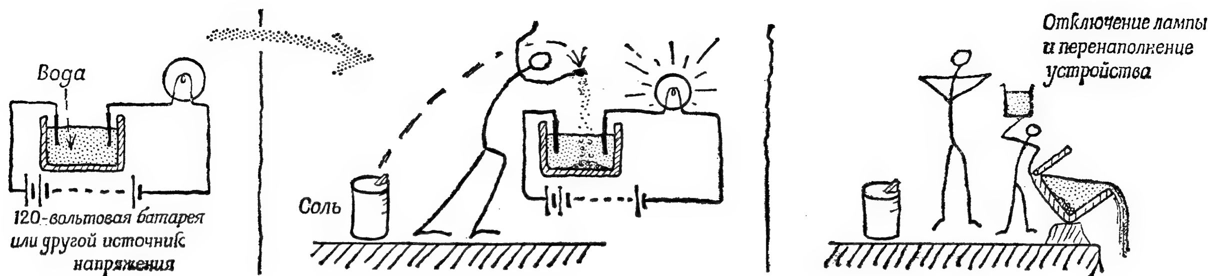
Таким образом,

СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ЛИСТОЧКОВ ЭЛЕКТРОСКОПА ПОЗВОЛЯЕТ НАЙТИ:
СКОРОСТЬ, С КОТОРОЙ ИОНЫ ВЫНОСЯТ СВОЙ ЗАРЯД ИЗ АТОМА
ЧИСЛО ИОНОВ, ПРОИЗВОДИМОЕ В СЕКУНДУ В ОБЪЕМЕ ЭЛЕКТРОСКОПА
ЧИСЛО АЛЬФА- (ИЛИ БЕТА--) ЧАСТИЦ, ПРОСТРЕЛИВАЕМЫХ ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРОСКОП В СЕКУНДУ
ЧИСЛО РАДИОАКТИВНЫХ АТОМОВ, РАСПАДАЮЩИХСЯ В СЕКУНДУ
ЧИСЛО АТОМОВ, ИМЕЮЩИХСЯ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ В ОБРАЗЦЕ

Следовательно, скорость движения листочков электроскопа измеряет наш образец. Определяя эту скорость снова и снова, с течением времени мы можем видеть, как образец распадается, и оценить период полураспада.

Счетчики Гейгера

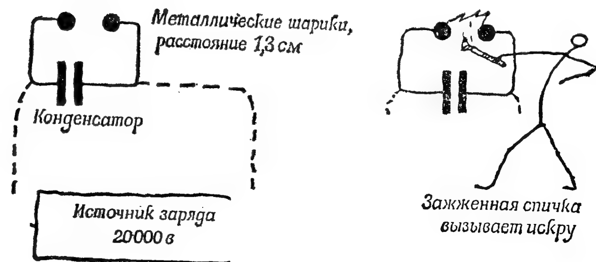
Для точных измерений мы теперь используем счетчик Гейгера. Он умножает ионы, произведенные каждой частицей, и создает стандартные импульсы большой величины. Эти импульсы могут быть легко сосчитаны. Альфа-частицы (или бета-частицы, или γ-лучи) образца простреливают маленькую коробочку, или трубку, содержащую подходящий газ. Они создают в этом газе ионы. Внутри трубки натянута изолированная проволочка. Между проволочкой и стенками трубки приложена большая разность потенциалов. Этим создается сильное электрическое поле в газе, особенно вблизи поверхности тонкой проволочки. Поле недостаточно велико для самопроизвольного проскакивания искры. Однако если в газе возникают какие-то ионы, они ускоряются электрическим полем настолько, что сами начинают производить ионы при столкновениях. Число образовавшихся ионов становится все больше и больше — развивается цепная реакция. Ионы переносятся поперек трубки к проволоке и стенкам электрическим полем и создают импульс заряда, который может быть усилен для приведения в действие механического счетчика или громкоговорителя. В гейгеровском счетчике простейшего вида используются электроны, выбитые из атомов газа, до того как они объединяются с нейтральными атомами в тяжелые отрицательные ионы. Эти электроны, движимые сильным полем, вблизи центральной нити выбивают



Фиг. 55. Предварительное изучение счетчиков.

Соедините батарею и лампу через сосуд с чистой водой. Добавьте горсть соли для создания в воде ионов: лампа загорится. Это устройство может служить счетчиком числа горстей, если после каждой вспышки производится выключение лампы и перенаполнение сосуда.

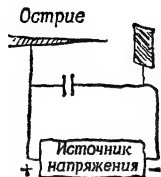
Фиг. 56. Заряжайте конденсатор от высоковольтного источника до тех пор, пока поле в зазоре не достигнет величины, близкой к началу самопроизвольного проскакивания искры. Поднесите зажженную спичку к зазору: с треском проскочит искра. Это устройство может служить счетчиком числа зажженных спичек. Оно имеет довольно большое «время восстановления» — источник должен зарядить конденсатор.



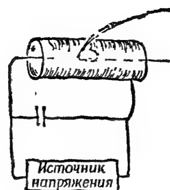
12*

Простейшая форма

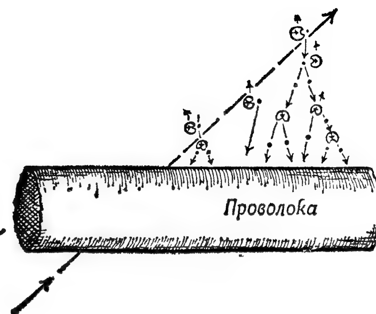
Новая форма



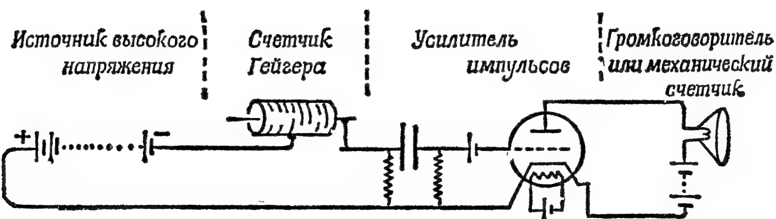








Фиг. 57. Гейгеровская счетная трубка.



Фиг. 58. Включение счетчика Гейгера.

электроны из других атомов, а эти электроны... и вся электронная лавина собирается центральной проволочкой.

Каждый ионизующий «луч», попадающий в трубку, действует как триггер. Когда вы смотрите на счетчик или слушаете громкоговоритель, вы ожидаете *свидетельства* взрыва в единичном радиоактивном атоме. Число импульсов за секунду, измеренное счетчиком Гейгера, используется для измерения количества радиоактивного вещества. Трубка соединяется через усилитель со шкалой, которая регистрирует импульсы, обычно с помощью маленьких зажигающихся неоновых лампочек [1].

Другие счетчики используют меньшее электрическое поле — ниже порога лавинообразования. В этом случае величина импульса будет пропорциональна полной энергии ионизующей частицы. Величина импульса показывает, сколько ионов производит частица, и тем самым позволяет оценить первоначальную энергию частицы. Распады отдельных ядер можно регистрировать и с помощью электроскопов специальных конструкций — со шкалой, которая рассматривается в микроскоп.

---

[1] Простейшее включение ламп использует систему умножения на 2: первая лампа мигает «да» («нет»)... при поступлении каждого импульса; вторая лампа мигает «да» («нет»)... после каждых 2 импульсов; третья лампа мигает «да» («нет»)... после каждых 4 импульсов; ... и т. д., счет импульсов ведется в шкале 1, 2, 4, 8, 16 и 32 вместо десятичной системы в шкале 1, 10, 100, ...

Это более экономичная шкала, легко читаемая при самой малой тренировке. Она также используется инженерами связи и проектировщиками автоматических устройств. Двоичная система применяется в большинстве вычислительных машин, использующих ячейки «да»—«нет». Применение таких ячеек с неизбежностью ведет к употреблению двоичной счетной шкалы. Горящие сигналы на шкале считываются таким образом: есть 1, нет 2, есть 4, нет 8, нет 16, есть 32, в сумме $1+4+32=37$. Механический счетчик (на фиг. 59 справа) покажет «1» каждый раз, когда все лампы зажжены и гаснут, т. е. при $[1+2+4+8+16+32+$еще один импульс$]$, или 64 импульсах. Показание механического счетчика на рисунке читается так: 152 раза по 64, а суммарный счет составляет $37+(152\times64)$, т. е. 9765 импульсов.



Фиг. 59.

Радиоактивный распад. Лабораторный эксперимент

Если вы можете получить небольшое количество радиоактивного материала с подходящим периодом полураспада, проделайте следующую серию измерений. Используйте скорость движения листочков электроскопа, или импульс/минута в счетчике как меру радиоактивности вашего образца. Отложите на графике РАДИОАКТИВНОСТЬ В ФУНКЦИИ ВРЕМЕНИ (в днях). Ваш график должен выглядеть подобно графику I на фиг. 60. График I показывает распад, но из него не следует постоянство периода полураспада. Причина этого может быть в том, что ваша оценка радиоактивности включает эффект *фона* в измеренную радиоактивность. Сделайте измерение фона без образца, вычтите его из каждого вашего результата и затем отложите разность на график. Существование фона является важным обстоятельством во многих научных измерениях. Для учета фона производится «холостой опыт» с реактивами в химии, выделяется «контрольная группа» в биологии, психологии, социологии.

После учета фона вы сможете оценить период полураспада из графика, подобного графику II, и вы должны убедиться в его постоянстве при длительных измерениях. Теперь возьмите логарифм каждого значения радиоактивности. В течение времени, равного периоду полураспада, величина радиоактивности *делится* на 2. Когда вы используете логарифмы, деление заменяется вычитанием логарифмов. За время полураспада логарифм радиоактивности должен уменьшиться на log 2 по сравнению с начальным значением. Если учтен фон, график log РАДИОАКТИВНОСТИ В ФУНКЦИИ ВРЕМЕНИ (в днях) должен убывать на log 2 для каждого отрезка времени, равного периоду полураспада, т. е. должен быть прямой линией. Прямая линия — лучшее свидетельство чисто случайного (*экспоненциального*) распада радиоактивного вещества [1]. (См. график III.)

---

[1] Мы можем определить характер изменения радиоактивности чисто расчетным путем. Если мы имеем N радиоактивных идентичных атомов в момент времени t, то dN/dt есть скорость *роста* радиоактивности, увеличения числа атомов в секунду. Скорость *распада* есть $-dN/dt$. Для чисто случайного процесса

СКОРОСТЬ РАСПАДА
СОСТАВЛЯЕТ ПОСТОЯННУЮ ДОЛЮ
ИМЕЮЩЕГОСЯ В ДАННЫЙ МОМЕНТ ЧИСЛА ОБЪЕКТОВ:

$-dN/dt = kN$, где k — постоянная доля,

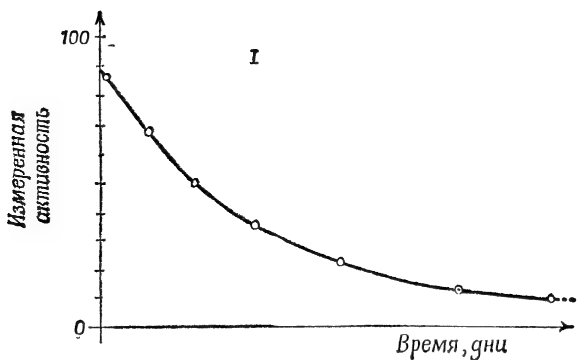
$$\int \frac{dN}{N} = \int (-k)\,dt,$$

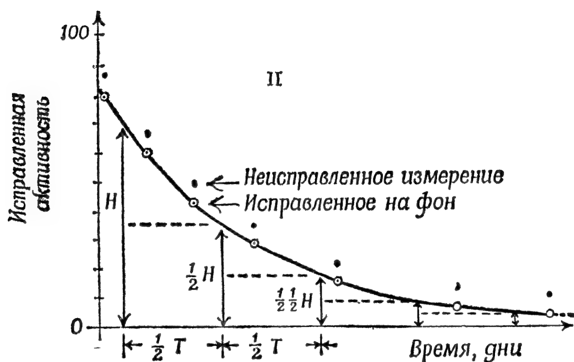
$\log \mathrm{N} = -kt + \mathrm{const}$ (и $\log N$ при *любом* основании, отложенный в функции от t, должен давать наклонную прямую линию);

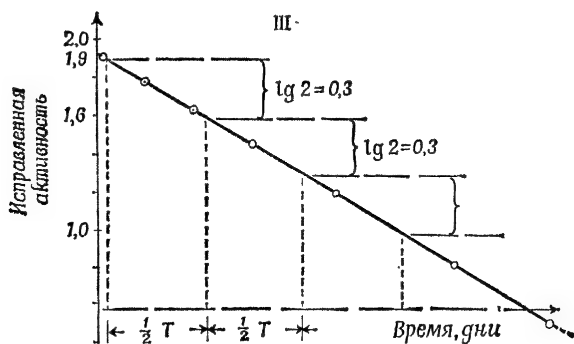
$\log \mathrm{N} = -kt + \log N_0$, где N_0 — начальное количество атомов при $t=0$,

$$N = N_0 e^{-kt}.$$

Такой экспоненциальный закон убывания часто фигурирует в науке.







Фиг. 60. Радиоактивный распад.

$\frac{1}{2}$ *T* — **период полураспада.**

Структура атома

Электроны легко отделяются от атомов при бомбардировке. Это позволяет грубо представить атомы состоящими из нескольких электронов, слабо связанных с неким массивным остатком.

Используя альфа-частицу для исследования атомов, мы находим, что все атомы в большей части своего объема пусты, а их легкие, слабо связанные электроны расположены снаружи, далеко от компактной массивной сердцевины.

Радиоактивные атомы показывают, что они сами нестабильны и могут испускать метательные снаряды высокой энергии. Мы видим, что частицы (и их энергия) исходят из сердцевины атома. Мы даже подозреваем, что все атомы, как стабильные, так и нестабильные, могут иметь субатомные частицы (α-частицы? электроны? ...? ...), локализованные в сердцевинах атомов и обладающие большим запасом энергии.

Полстолетия тому назад это были только важные допущения. Более поздние эксперименты и размышления над их результатами позволили сделать уточнения и построить полезную *модель атома*, в центре которого располагается ядро.

Задачи к главе 39

Задачи 1—5 — предварительные задачи, помещенные в конце предыдущей главы, задача 6 помещена в тексте этой главы.

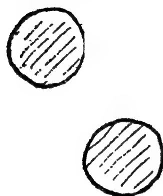
Задача 7

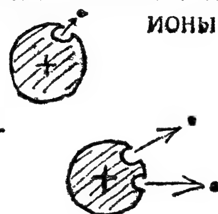
Предположим, вы получили радиоактивную медь с периодом полураспада 10 мин.

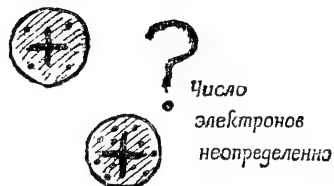
а) Сколько периодов полураспада содержится в одном часе для этого образца?
б) Какая часть первоначального количества меди останется у вас через один час после получения?
в) Какая часть меди останется у вас через 2 часа после получения?

Задача 8

Фиг. 64 показывает часть диаграммы, составленной по данным, имеющимся в таблице, включенной в эту главу. Сделайте полную диаграмму для всей таблицы, используя данные, приведенные в таблице. Вы можете показать нестабильность атома (в таблице приведены периоды полураспада) с помощью волнистой линии, которую будете проводить на границе атома. Заметьте, что радий относится к той же группе химических элементов, что и барий, и имеет химические свойства, близкие свойствам бария, но он не является тем же химическим элементом, что и барий. Он может быть отделен от бария


АТОМЫ
Натуральный размер x 10⁸
Бомбардировка или
электрические поля


ЭЛЕКТРОНЫ и ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ ИОНЫ


СТРУКТУРА АТОМОВ
Число электронов неопределенно

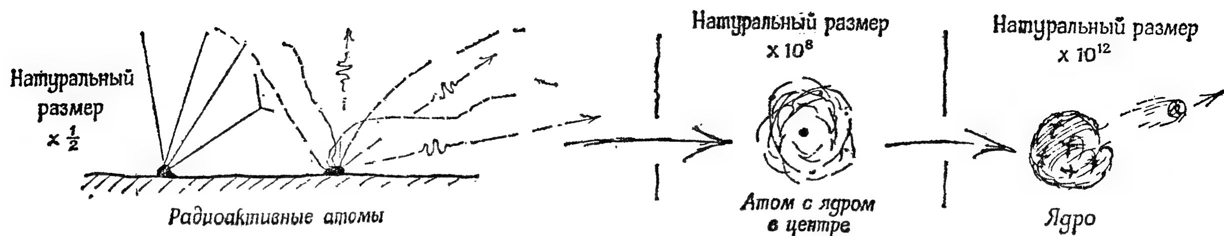
Фиг. 61.


Натуральный размер
α-частица
Радий
Редкое большое столкновение

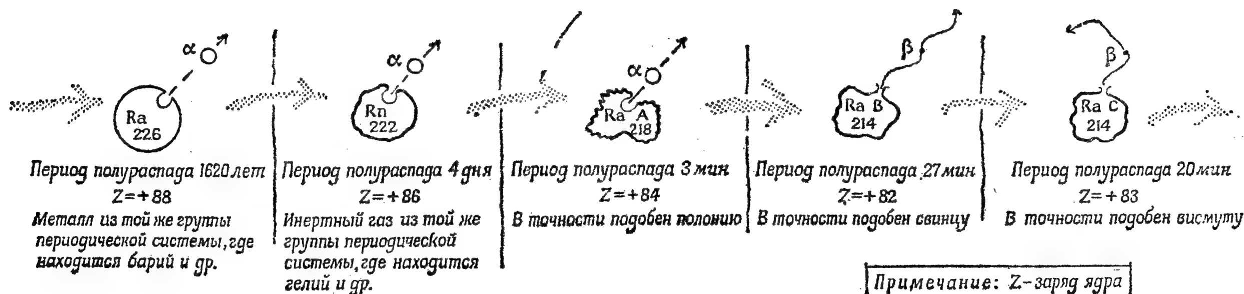



Атом с ядром в центре
Натуральный размер x 10⁸

Фиг. 62.



Фиг. 63.



Фиг. 64. Эскиз к задаче 8.

химически. Подобно этому, радон есть что-то, *напоминающее гелий. Оба они являются инертными газами. В то же время радий* В *имеет химические свойства, совершенно точно совпадающие с химическими свойствами свинца. Это один и тот же элемент, и они неразделимы химически. Однако радий* В *нестабилен (=радиоактивен), а свинец стабилен.*

Задача 9

а) Для измерения распада радиоактивного элемента используется счетчик Гейгера. Фон дает 20 отсчетов (импульсов) в минуту. Измерения с образцом дают:

ВРЕМЯ (в днях)	«СКОРОСТЬ СЧЕТА»
	в отсчетах (импульсах) в минуту
0 (начало)	120
6 *час* после начала	70
8 *час*	60
10,5 *час*	50
20 *час*	30

Выберите результаты измерений, которые вам кажутся подходящими, и оцените период полураспада элемента (нет необходимости использовать логарифмирование).

б) Счетчик Гейгера используется для измерения распада радиоактивного элемента. Используйте логарифмы для оценки периода полураспада элемента по данным, приводимым ниже. Фон пренебрежимо мал по сравнению с высокой скоростью счета в присутствии образца.

Скорость счета вначале . . . . . 1000 отсчетов в 1 *мин*
Скорость счета 2 *час* спустя . . . 100 отсчетов в 1 *мин*

$\log 2 = 0{,}301$ $\log 3 = 0{,}477$ $\log 5 = 0{,}700$

Задача 10

Предположите, что вы имеете смесь одинакового количества атомов двух радиоактивных элементов — А *с периодом полураспада 6 мин,* Б *с периодом полураспада 60 мин и что оба они излучают бета-лучи. Вы измеряете* β-*излучение смеси с помощью электроскопа.*

а) Который из двух элементов, А *или* Б, *будет воздействовать на ваш электроскоп сильнее в течение первых нескольких минут?*

б) Скажите, какая приблизительно часть общего эффекта обусловлена тем элементом, который вы назвали в а)?

в) Какой элемент должен давать больший эффект (при малом суммарном эффекте) через 2 часа?
г) Какую приблизительно часть суммарного эффекта вы имели в виду, формулируя ответ в в)?
д) ТРУДНЫЙ СДЕЛАЙТЕ УМНУЮ ДОГАДКУ.
Предположите, что вы измеряете активность подобной смеси 2 часа или больше. Набросайте приближенно вид графика, который вы должны получить в координатах: log скорости движения *(исправленной на фон) листочков электроскопа по вертикальной оси и* время (в днях) *по горизонтальной.*

Задача 11

а) Опишите главные различия в виде треков альфа-лучей и бета-лучей в камере Вильсона.
б) Используйте ваши знания о природе альфа- и бета-лучей для объяснения этих различий.

Задача 12

При наблюдении треков альфа-лучей в камере Вильсона вы можете видеть, что все они прямые. При исследовании большого числа фотографий можно увидеть трек с крутым изломом и с другим треком, начинающимся от места излома (трек в виде «вилки»).
а) Что видите вы поучительного в том, что подавляющее число треков имеет вид прямых линий?
б) Как вы думаете, что случается, когда трек имеет излом?

Задача 13

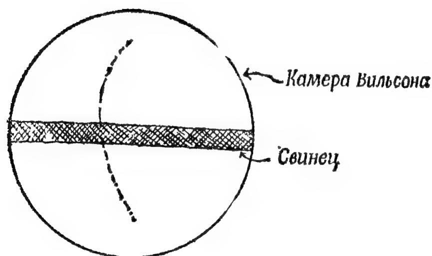
Когда альфа-лучи пропускаются через влажный гелий, треки их изредка изламываются. При этом наблюдается следующее:
1. Угол между двумя ветвями «вилки» очень близок к 90°.
2. Обе ветви «вилки» подобны, они одинаково заселены водяными каплями.
а) Какое заключение можете вы сделать только из наблюдения 1?
Какое предположение вы можете сделать?
б) Принимая во внимание ваш предыдущий ответ, какой вывод вы можете сделать из наблюдения 2?

Задача 14

а) Когда быстрый электрон простреливается через камеру Вильсона, его тонкий, близкий к прямому трек иногда показывает излом, дающий разветвление под углом 90°. Обе ветви выглядят приблизительно одинаково тонкими. Объясните этот случай.
б) Когда очень быстрый электрон испытывает столкновение, подобное такому, как в а), ветви идут под углом, меньшим 90°, и одна из ветвей направлена вперед приблизительно по пути начального трека. Предполагая, что другие данные указывают на тот же тип столкновения, что и в а), объясните изменение в геометрии.

Задача 15

Космические лучи являются потоками частиц очень высокой энергии (и γ-лучей), которые движутся со всех сторон к нам и сквозь нас. Они состоят из смешанного потока атомных ядер, электронов и других частиц. Положительные электроны (позитроны) *были открыты в камере Вильсона в 1932 г. в треках, произведенных космическими лучами. Электроны очень высокой энергии проходят через камеру Вильсона (через ее стенки и другие детали) и дают в ее рабочем объеме прямой трек, который можно сфотографировать благодаря водяным капелькам, образованным на ионах, возникших при столкновениях между быстрым электроном и электронами атомов в камере. Ионы разделены значительными расстояниями, так как они созданы очень легкой и очень быстрой частицей. Трек выглядит довольно тонким, но его можно сфотографировать. Если наложить сильное магнитное поле (перпендикулярно треку), трек слегка изгибается. Электроны очень высоких энергий могут легко проходить через толстые металлические пластинки, хотя при этом они будут терять часть своей энергии.*



Фиг. 65. К задаче 15.

а) Если мы знаем из наблюдения трека, что он образован электроном, то что мы можем узнать, измеряя кривизну *трека?*

б) Если трек искривлен в направлении, противоположном искривлению большинства треков, то мы предполагаем, что он произведен либо *положительным электроном в отличие от остальных отрицательных электронов,* либо *отрицательным электроном, который был... ?*

в) Для выбора одного из двух предположений в б) введите металлическую пластинку в середину камеры, рассчитывая, что трек пройдет через пластинку. Такие случаи происходят (фиг. 65 и фиг. 123).

Каким образом результат сможет подсказать нам решение?

Задача 16

В гл. 43 (фиг. 125) приведена картина, полученная в камере Вильсона при столкновении «нейтрона», приходящего в известном направлении от источника. Трек самого «нейтрона» невидим. Какое заключение можете вы сделать из этого? Дайте ясное объяснение вашего заключения.

Задача 17

Нарушения, производимые в живой ткани радиоактивным материалом (могут быть ожоги и другие нарушения в тонких слоях), вызваны главным образом ионизацией в ткани.

а) *Какие лучи вызывают бо́льшие нарушения в ткани — те, которые тормозятся в ткани, или те, которые легко проходят через нее?*

б) *Сравнивая α-лучи, β-лучи и γ-лучи одинаковой энергии, мы видим, что α-лучи теряют всю свою энергию на создание большого количества ионов на пути в несколько сантиметров в воздухе; β-лучи создают намного меньше ионов на сантиметре пути и преодолевают много большее расстояние в воздухе; γ-лучи пролетают через воздух, оставляя на единице пути очень малое число ионов. γ-луч передает часть своей энергии электронам отдачи при случайных встречах. Но в конце концов он отдает какому-то электрону всю свою энергию. В этом случае электрон выбрасывается из атома с очень высокой скоростью и является подобным β-лучу — он создает много ионов при своем замедлении. (Хотя γ-луч может создать β-луч, отдавая всю свою энергию электрону, он отказывается от «выбора» подходящего электрона при столь многих встречах, что успевает внедряться в вещество на большие расстояния.) Нарушения, вызванные такими лучами, иногда могут быть полезны для подавления роста злокачественных образований.*

   1) *Какое излучение и* почему *вы порекомендуете пациенту для лечения кожи: α-, β- или γ-излучение?*
   2) *Как глубоко заденет кожу и лежащую под ней мягкую ткань обработка излучением?*
   3) *Что может применяться для облучения внутренних органов?*

Задача 18

а) *Около вас могут пронести 1 г радиоактивного элемента с коротким периодом полураспада или 1 г радиоактивного элемента с большим периодом полураспада. Какой из них является для вас более опасным?*

б) *Разные изотопы плутония имеют различные периоды полураспада. Первый изотоп плутония был произведен циклотронной бомбардировкой. Он имеет относительно небольшой период полураспада. Был ли он в силу этого более безопасным при проведении предварительных экспериментов, которые должны были выполняться для определения химических свойств плутония в то время, когда первые урановые реакторы еще строились? (См. гл. 43.)*

Задача 19

Через трубку выпускается тонкая струя пара из парового котла. На расстоянии первых нескольких сантиметров от конца трубки пар практически невидим, но дальше образуется маленькое облако. Один изобретатель пытался «устранить облако электрически», пропуская искры через струю у самого среза сопла. Объясните, почему его попытка потерпела неудачу. (Найдите доказательство невозможности «электрического устранения облака».)

Задача 20. Возможности использования индикаторов

Предположим, ваш дядя, вице-президент маленькой корпорации, спросил вас, как радиоактивные индикаторы могут использоваться для решения производственных проблем его бизнеса. Он изучал физику много лет назад, к тому же физику в основном классическую, с небольшими сведениями по атомной физике. Он, конечно, ничего не знает о радиоактивных индикаторах. Объясните ему, как вы будете использовать индикаторы, в примерах, приведенных ниже, и ответьте на два его вопроса: 1) «Однако предмет будет оставаться навсегда радиоактивным?» 2) «Зачем мне знать период полураспада и что это значит — «учитывать распад»?».

а) Ваш дядя управляет фермой, где выращивают цыплят, и он нашел, что слишком много яиц имеет мягкую скорлупу. Он сказал: «Не стоит больше добавлять в пищу устричную скорлупу. Куры используют кальций только тогда, когда они высиживают цыплят!» Объясните ему, как вы будете применять индикатор для того, чтобы узнать, будет ли мел (карбонат кальция), даваемый курам в пищу, быстро попадать в яичную скорлупу. (Предположите, что вы можете получить небольшое количество Ca^{47} *с периодом полураспада 4,8 дня. Этот изотоп сейчас можно купить.)*

б) Ваш дядя управляет сталелитейной компанией, прокатывающей тонкие стальные листы 30 см шириной и несколько тысячных долей сантиметра толщиной. Как может он быть уверен, что лист имеет постоянную толщину, когда он еще горячий и находится в движении? Предположите, что вы получаете Fe^{59} *с периодом полураспада 46 дней. Объясните, почему индикатор не создает никакой опасности для потребителей стали.*

ГЛАВА 40 • АТОМЫ. ЭКСПЕРИМЕНТ И ТЕОРИЯ

Теория — обаятельная мать тяжелого, нудного эксперимента.

Харлан Мэйс, мл., Принстон
(Из экзаменационной работы по элементарной физике, 1949 г.)

Настоящая глава представляет собой обзор атомной теории от идей греков до ранней модели атома, содержащего ядро.

Ранние представления об атомах и молекулах

Еще задолго до того, как появились реальные данные, ведущие к понятиям атомов и молекул, греческие мыслители представляли себе материю созданной из огненных движущихся частиц, названных «атомами», что означает неделимые бесконечно малые объекты, которые казались непостижимыми. Вероятно, эта картина возникла в результате действительно научных рассуждений — о движении в природе, а может быть, созданию ее благоприятствовала детская жажда определенных правил и упрощенных представлений, которые позволят считать трудный для понимания окружающий мир менее сложным, более понятным. Мы не должны презирать это убеждение в простоте природы, даже если подозреваем, что основы этого убеждения ненадежны. Современная наука построена на более взрослом представлении, что в природе все *закономерно*. Мы постоянно имеем дело с простыми законами, описывающими наши экспериментальные данные, и при создании теории добиваемся простоты. Первичная основа всей нашей науки может состоять из простых недоказанных положений, используемых в качестве исходных точек для сложных выводов, результаты которых затем проверяются и применяются для описания материального мира.

Представления греков об атомах были только удачными догадками, но они создали основу, облегчившую ученым будущих времен постановку вопроса о теории атома, когда эксперименталь-

ные данные были собраны и настало время для создания научных теорий [1].

Убеждение греков в возможности простого сведéния природы к четырем элементам — Земле, Воздуху, Огню и Воде — развивалось в последующие века. Подобное убеждение было и у нас, подготовив тем самым к восприятию гипотезы Проута; позднее она была блестяще подтверждена с помощью масс-спектрографа. Однако как ученые мы не удовлетворены ее простотой, а обращаем внимание на небольшие отклонения от этой простоты, что ведет к новой области знаний — к представлениям об атомной энергии.

Доказательство существования атомов и молекул, 1700—1900 гг.

Поскольку химия развивалась из алхимии, она поощряла идею существования атомов как основных строительных кирпичей, из которых образованы молекулы и соединения. Химические соединения могут быть расщеплены на составляющие элементы, пропорции которых можно измерить прямым взвешиванием. Опыт показывает, что данное соединение всегда имеет те же самые пропорции составляющих — результат, который легко «объясняется» с помощью допущений: а) что каждый элемент имеет свой собственный сорт идентичных атомов и б) что сложные молекулы состоят из идентичных групп таких атомов.

Например, соляная кислота всегда разлагается на водород и хлор в пропорциях 1 к 35,5 по массе. Мы воображаем все водородные атомы подобными с массой M и все атомы хлора подобными с массой 35,5 M, а также все молекулы соляной кислоты подобными, содержащими атом водорода и атом хлора, соединенные вместе, с массой $M+35,5$ M или 36,5 M. Принимая эту картину, мы должны *ожидать*, что все анализы соляной кислоты дадут те же пропорции 1 к 35,5, и это так и есть. Однако этот факт не имеет ценности для формирования картины строения молекул («теории»?), действительно объясняющей подобные наблюдения, так как на самом деле картина создается *в результате* наблюдений. Химический анализ подсказывает нам две другие мысли:

---

[1] Некоторые жидкости неограниченно смешиваются с другими; многие твердые тела растворяются в жидкостях; цветные краски быстро и равномерно распределяются в жидкостях; газы диффундируют и сжимаются. Эти обычные наблюдения наводят на мысль о существовании перемешивающихся крошечных частиц, таких, как атомы или молекулы. Танец пылинок в солнечном луче намекает на характер движения атомов.

1. Одинаковые элементы дают совершенно различные соединения: в подобных случаях пропорции в одном соединении очень просто связаны с пропорциями в другом соединении. Например, водород и кислород соединяются, образуя воду, в пропорциях 2 к 16 по весу. Они также соединяются в пропорции 2 к 32, образуя другое соединение. Эти два соединения в химических сокращениях обозначаются как H_2O и H_2O_2.

2. *Те же самые* относительные значения масс должны использоваться для атомов элементов во всех соединениях, которые они образуют в сложных молекулах, состоящих более чем из одного атома, скажем из двух или трех. (Например, мы можем обозначить массы атома водорода, атома кислорода и атома хлора как 1, 16, 35,5. Эти массы годятся для *всех* соединений, где есть H, или O, или Cl, таких, как HCl, H_2O, H_2O_2, $HClO_4$.) Точно так же при строительстве из детского конструктора все сооружения состоят из нескольких типов одинаковых деталей. Подобные очевидные соображения поддерживали ранние химические представления об атомах и молекулах; факты легко понимались в терминах атомов и молекул, но не давали *доказательства* существования атомов. Кинетическая теория газов, которую начал продумывать Ньютон и затем развили Джоуль и другие, показала, что представление о движущихся упругих молекулах может «объяснить» закон Бойля и дает другие предсказания, хорошо согласующиеся с экспериментом. Это снова поддержало идею о существовании молекул, но опять-таки не доказывало их существования. И все же представление о молекулах облегчало размышления о свойствах газов.

Казалось, что броуновское движение делало представление о движущихся молекулах в газах и жидкостях действительно реальным. Наблюдатели ощущали себя созерцающими едва ли не молекулярные бомбардировки. Допуская в кинетической теории представление о равнораспределении энергии, можно было использовать измерения броуновского движения для оценки масс молекул газа. Полученные значения масс были невероятно малыми и составляли

$$\frac{1}{300\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000}\ \text{кг}$$

для *молекулы* водорода. (Бо́льшие значения масс получены для других молекул. Их можно легко оценить по результатам химических взвешиваний.)

Между тем экспериментальные данные, полученные при изучении электролиза, приводили к представлениям о заряженных ионах в растворах, способных переносить ток при наложении

электрического поля. Если все ионы одного элемента состоят из идентичных атомов или групп атомов, то явление электролиза показывает, что электрические заряды всех ионов должны быть одинаковыми. Каждый ион данного вида должен иметь один и тот же самый заряд. Часть ионов имеет заряд «+», часть «—», а некоторые виды ионов имеют удвоенные или утроенные заряды; кроме того, любые заряды любых ионов должны быть кратны некоему универсальному единичному заряду. Таким образом, представления об «атомах» электрического заряда соединились с представлениями об атомах век тому назад.

Атомные веса и атомные номера

В прошлом веке химики взвесили атомы многих элементов и создали каталог их свойств. При этом об абсолютных массах атомов можно было лишь смутно догадываться, но *относительные* массы были точно измерены с помощью химического разделения и взвешивания. Эти массы в шкале, где масса атома водорода принята за 1, были названы *атомными весами* (A) [1].

Химики, люди профессионально систематичные, расположили свои химические элементы точно по порядку возрастания атомных весов: водород — 1,0 [гелий, открытый позже,— 4,0], литий — 6,9, бериллий — 9,0, бор — 10,8, углерод — 12,0, азот — 14,0, кислород — 16,0, фтор — 19,0 и т. д. Затем они пронумеровали свои элементы по порядку: водород — № 1, гелий — № 2, литий — № 3 и т. д. Эти порядковые номера были названы атомными номерами и стали обозначаться буквой Z. Каждый из них составляет примерно около половины соответствующего атомного веса [2].

Гипотеза Проута

Появилась новая догадка, что даже атомы, основные строительные кирпичи вещества, сами составлены из групп простейших строительных блоков — из атомов водорода (Проут). Целочисленность атомных масс находилась в соответствии с догадкой Проута. Целочисленность встречается слишком часто, чтобы быть чисто случайной. Примеры: водород — 1, углерод — 12, кислород — 16. Однако были и досадные исключения. Например, хлор,

---

[1] В наши дни величина A — целое число, ближайшее к «атомному весу» изотопа,— называется «массовым числом изотопа».

[2] В этом месте оригинала не приводится имя великого русского ученого Д. И. Менделеева, создателя периодической системы элементов.— *Прим. перев.*

атомный вес которого был тщательно измерен, имел дробный атомный вес 35,5; это же имело место для меди — атомный вес 63,6. Таким образом, гипотеза Проута была отброшена, чтобы снова возродиться в нашем веке после открытия изотопов. Мы знаем теперь, что хлор имеет 2 сорта атомов с относительными массами 35,0 и 37,0. Обычный газообразный хлор является смесью этих атомов. Независимо от источника, откуда был взят хлор, смесь состоит из одинаковой пропорции двух близнецов хлора. Так как близнецы химически неразделимы, химики были уверены, что они имели дело с одним хлором с атомным весом 35,5.

Размеры атомов

Размеры атомов, если их представить в виде круглых твердых тел, были приближенно известны в прошлом веке: диаметр атома оценивался в несколько Å (10^{-10} *м*). Диаметр может быть оценен несколькими путями.

1. Оценка средней длины свободного пробега (ДСП) при определенных давлениях в газах дает «диаметры» сталкивающихся молекул, или, точнее, хорошее приближение к ним. Значение ДСП можно оценить из результатов измерений внутреннего трения в газе. (Конец XIX столетия.)

2. Измерение поверхностного натяжения тонких пленок масел давало оценку размеров *длинных* молекул органических соединений. (Конец XIX столетия.)

3. В нашем веке мы получили более определенные оценки. Зная массы отдельных атомов (например, из наблюдения броуновского движения), мы можем рассчитать *число* их, например, в твердом бруске известного размера. По этому числу можно рассчитать среднее расстояние между отдельными атомами. Применительно к твердому телу мы будем называть это расстояние «диаметром» атома. Более надежные данные для подобных расчетов были получены объединением результатов измерений e/M для ионов с величиной e из опытов Милликена.

Во всех этих оценках была значительная неопределенность; кроме того, некоторые из этих оценок относились к атомам, другие — к молекулам, являющимся группами атомов. И все-таки оценки определенно указывали на диаметр около 10^{-10} *м* для атома и несколько больше для молекулы. В нашем веке эти оценки были подтверждены измерением с помощью рентгеновских лучей расстояний между слоями атомов в кристалле.

Строение атомов, 1890—1910 гг.

К концу прошлого века были открыты и исследованы катодные лучи и положительные лучи. В разрядной трубке, содержащей газ при низком давлении, сильное электрическое поле создает 2 потока частиц:

1. *Катодные лучи.* Кажется, что они образуются вблизи электрода, соединенного с минусом батареи. Они проходят через трубку и могут проскочить через отверстие в положительном электроде, как поток заряженных частиц.Отклонения в электрическом и магнитном полях показывают, что они являются отрицательно заряженными частицами, движущимися очень быстро и имеющими одинаковое для всех них e/m независимо от вида газа.

2. *Положительные лучи.* Они идут в противоположном направлении и могут проходить через отверстие в отрицательном электроде. Отклонения в полях показывают, что они являются положительно заряженными, имеют высокие скорости и различные значения e/M, во много раз меньшие, чем e/m для катодных лучей.

Мы называем отрицательные частицы катодных лучей «электронами». Мы получаем те же самые электроны с тем же значением e/m во многих процессах. Они могут испаряться из раскаленных нитей, выбиваться из металлов светом, вырываться из атомов рентгеновскими лучами. Они также испускаются некоторыми радиоактивными атомами (бета-лучи). Их e/m в 1840 раз больше, чем e/M для ионов водорода при электролизе. Мы догадываемся (на основании серьезных косвенных доказательств), что заряд e имеет одно значение и для электронов, и для ионов водорода в газе или растворе и, следовательно, что электроны имеют массу, близкую к 1/1840 массы атома водорода. Электроны кажутся универсальными одинаковыми составляющими разных атомов, довольно легко отделяющимися при бомбардировке атомов и в других процессах.

Частицы положительных лучей представлялись остатками атомов после потери ими одного или нескольких электронов. Их e/M имеет то же значение, что и для соответствующих ионов при электролизе. И на самом деле положительные лучи *есть* быстро движущиеся ионы. Они могут быть группами атомов или единичными атомами и могут иметь несколько «+» зарядов (например, H^+,O^+, O^{++}, H_2O^+, CH_3^+).

Первоначальная картина атомной структуры содержала две эти составляющие. Для сохранения стабильности системы элек-

троны представлялись втиснутыми в большой положительно заряженный шар и выглядели наподобие изюминок в пудинге. Это была модель, предложенная Дж. Дж. Томсоном и общепринятая в начале нашего века: массивный положительный «пудинг» 10^{-10} *м* или более в диаметре с довольно маленькими, легкими отрицательными электронами, вставленными в него в количестве, как раз достаточном, чтобы сделать «пудинг» нейтральным. Подобная картина объясняла эффекты, наблюдавшиеся в разрядной трубке, и позволяла легко понять, почему очень быстрые частицы, подобные альфа- и бета-лучам, могли проходить прямо через вещество. Они проходили прямо через «пудинг», никогда не сталкиваясь с объектами достаточно большой массы, имеющими достаточно большой заряд для того, чтобы вызвать сильные отклонения.

Так же как археолог производит реконструкцию из осколков, Томсон и другие создали атомную модель из кусков разбитых вдребезги атомов, найденных в электрической разрядной трубке. Однако такое простое воссоединение составляющих поставило серьезные вопросы. Отрицательные электроны не могли бы оставаться свободно лежащими снаружи положительного остатка, они были бы втянуты внутрь огромными силами, действующими на таких маленьких расстояниях; они должны были бы проваливаться внутрь положительного остатка. Нельзя было создать воображаемую модель из «+» и «—» частиц, удерживающих друг друга в равновесии, при существовании закона обратных квадратов для сил, действующих между частицами. Электрические притяжения и отталкивания в принципе могли бы удерживать их в равновесии, но образование при этом было бы *нестабильным* — любые малые нарушения должны были углубляться и вести к разрушению системы. (Школьник, проводящий опыты с магнитами, может заставить один из них какое-то мгновение плавать в воздухе, но этот плавающий магнит скоро свалится в сторону, если только школьник не приложит к нему силу, не подчиняющуюся закону обратных квадратов, например своими пальцами или деревянными подпорками.) Ирншоу показал, что такая нестабильность неизбежна. Любая совокупность покоящихся тел, *действующих друг на друга только силами, подчиняющимися закону обратных квадратов*, — электрические заряды, магниты, притягивающиеся массы,— находится в неустойчивом равновесии. Он вывел теорему, показывающую это из уравнения $\nabla^2 V = 0$ — математической записи закона обратных квадратов. Теорема Ирншоу не относится к системам, движущимся *с ускорением*, например, к электронам, вращающимся подобно планетам на орбитах, но предположение о таком дви-

жении порождало другое серьезное возражение. Электрон, бегающий по орбите, имеет ускорение v^2/r. Хорошо известно, что при движении зарядов с ускорением должны излучаться электромагнитные волны. Следовательно, вращаясь на орбите, электрон должен излучать, терять энергию, и его орбита стянется к центру за ничтожную долю секунды. Первые опыты в области радио показали, что если заряды *ускоряются* (при протекании переменных токов в радиоантеннах), то волны *излучаются.* Свет, относительно которого известно, что он по существу является радиоволнами с очень короткими длинами волн, по всей вероятности, излучается электронами, ускоряющимися где-то в атоме. Атомы *иногда* могут излучать свет, представить же их излучающими непрерывно мы не можем — они должны были бы скоро прекратить свое существование. Для обхода этой трудности Томсон представил электроны встроенными в положительный «пудинг» и предположил, что они связаны загадочными силами, не подчиняющимися закону обратных квадратов и обеспечивающими устойчивость атома.

Однако к 1910 г. эта картина перестала быть удовлетворительной. Альфа-частицы, использовавшиеся как снаряды для исследования структуры атома, дали результаты, которые не могли быть объяснены моделью атома в виде пудинга. Резерфорд предложил *новую модель атома*, почти пустого, с крошечным атомным ядром, окруженным электронами, движущимися по орбитам — и ничего не говорящую о трудной проблеме излучения электрона.

Рассеяние альфа-частиц и атом Резерфорда, 1910—1915 гг.

Поток альфа-частиц может насквозь простреливать тонкие слои, например фольгу из золота. Но некоторые из альфа-частиц отклоняются от прямого пути на небольшие углы, скажем 5 или 10°. В редких случаях альфа-частицы отклоняются на большие углы — на 60 или на 80°, а в очень редких случаях отклоняются на очень большие углы, например на 150°. Вы можете видеть такие случаи в камере Вильсона — будет наблюдаться «вилка» очень редкой формы. Резерфорд подсчитал экспериментально относительное число случаев рассеяния на большие углы и увидел, что модель атома Томсона не согласуется с тем, что большие отклонения случаются редко. Если «пудинг» представляет собой твердый объект, то *все* альфа-частицы должны отклоняться. Если атом — очень рыхлый объект, то *все* частицы должны идти прямо. Отскакивание назад может произойти при столкновении с чем-то тяжелым (с массой, большей, чем у

альфа-частицы, а было известно, что она являлась заряженным атомом гелия), и при этом должны были действовать большие силы отталкивания. Резерфорд предположил, что эти силы могут возникать при действии обычного закона обратных квадратов в процессе отталкивания между зарядом альфа-частицы и зарядом положительной части атома золота. Если это так, альфа-частицы должны приближаться к положительному заряду на расстояния, намного меньшие, чем 1 или 2 Å («размер атома»), чтобы испытать действие сил, способных замедлить их и отбросить назад. Далее, необходимо предположить, что «+» заряд атома золота не экранирован действием собственных отрицательных электронов. Таким образом, Резерфорд предложил новую модель атома: чрезвычайно малое положительно заряжен ое ядро, в котором сконцентрирована почти вся масса атома, и определенное число электронов, расположенных далеко от ядра и вращающихся на орбитах наподобие планет, вращающихся вокруг Солнца. По Резерфорду, следовало, что

атом водорода имеет ядро с элементарным зарядом $+e$ и внешний электрон с зарядом $-e$;
атом гелия имеет ядро с удвоенным зарядом $+2e$ и два внешних электрона, каждый с зарядом $-e$;
атом лития имеет ядро с зарядом $+3e$ и три внешних электрона и т. д.

Такую запись можно продолжать для других элементов периодической системы. По Резерфорду, Z-й атом с атомным номером Z, определяющим место элемента в периодической системе, будет иметь ядро с зарядом $+Ze$ и Z внешних электронов.

Затем Резерфорд поставил следующие математические вопросы:

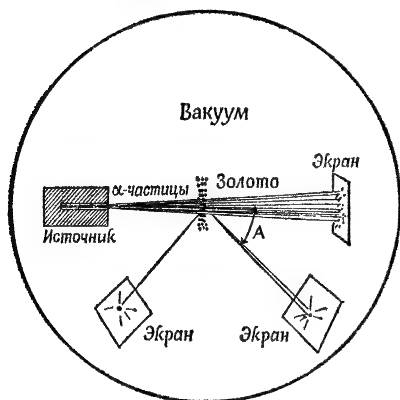
«1. Если альфа-частица с «++» зарядом выстреливается прямо в атом, какую форму должна иметь траектория альфа-частицы в области, занятой электронами, и вблизи ядер?
2. Если именно такие атомы находятся в тонкой золотой фольге, как должны быть распределены альфа-частицы по направлениям после ударов альфа-частиц о фольгу?

Примем закон обратных квадратов для сил отталкивания между альфа-частицами и сердцевиной атома. Предположим, что сердцевина атома золота несет заряд $+Ze$».

Математический аппарат дает ясные предсказания:

1. Траектории должны иметь гиперболическую форму [1] (для отталкивания, в то время как законы Кеплера дают эллиптическую форму траекторий при действии притяжения).
2. Распределение рассеянных альфа-частиц должно следовать определенному соотношению между их скоростями и направлениями; справедливость этого соотношения может быть экспериментально проверена.

К 1910 г. еще не была развита методика счета альфа-частиц с помощью счетчика Гейгера и не было достаточного для статистической обработки количества фотографий столкновений альфа-



Фиг. 66. Рассеяние альфа-частиц.

частиц в камере Вильсона. Резерфорд использовал для наблюдений крошечные вспышки света («сцинтилляции»), возникающие при ударах альфа-частиц об экран, покрытый минералом. Наблюдатель должен был находиться около 20 *мин* в темноте, пока его глаза адаптируются. После этого, прослеживая экран в микроскоп, он видел слабые вспышки от каждой альфа-частицы, ударившейся в экран [2].

---

[1] Расчеты предсказывают:

при действии сил притяжения траектории будут описываться уравнением эллипса $x^2/a^2+y^2/b^2=1$ или (для скоростей, превышающих скорость, необходимую для выхода из зоны притяжения) уравнением гиперболы $x^2/a^2-y^2/b^2=1$;

при действии сил отталкивания траектория всегда будет гиперболической.

[2] В настоящее время мы снова вернулись к использованию сцинтилляций, но применяем электронный глаз (фотоумножитель) для усиления эффекта и наблюдения сцинтилляций.

Итак, математический аппарат предсказывал число сцинтилляций, ожидаемых на маленьком подвижном экране, располагаемом в различных положениях для подсчета альфа-частиц, отклоненных от своей траектории на определенные углы. Эти предсказания были тщательно проверены. Предсказанное число частиц составляло следующую часть полного числа частиц, выстреливаемых в золотую фольгу (большинство частиц проходит через фольгу без отклонений):

$$\frac{K\,(\text{площадь экрана})(2e^2)\,(Ze)^2}{(\text{скорость }\alpha\text{-частиц})^4}\cdot\frac{1}{\sin^4(A/2)},$$

где K — константа, которую можно рассчитать из геометрии опыта (расстояния от точки пересечения α-лучей с экраном до фольги и толщины фольги); $+Ze$ — заряд ядер золота, заряд, который имели бы Z положительно заряженных электронов; A — угол отклонения. Это предсказание было основано на законе обратных квадратов, без которого ни сомножитель $1/v^4$, ни $1/(\sin^4\frac{A}{2})$ не могли появиться. Резерфорд и его сотрудники исследовали оба эти предсказанных множителя.

Используя α-частицы с известными большими, средними и малыми скоростями, они проверили предсказание

$$\text{число ударов об экран} \sim \frac{1}{v^4},$$

умножая найденные числа ударов об экран на v^4. Вы уже встречались с результатами этих измерений в задаче 3 гл. 18. Результаты измерений очень хорошо совпадали с предсказанными. Это само по себе давало ясное указание на законность применения закона обратных квадратов. Для рассеяния на один и тот же угол более быстрые частицы должны были пройти ближе к ядру — при этом возникают большие силы в их более короткой встрече,— и мы должны ожидать тем меньшее число попаданий (в среднем) таких частиц, чем меньше диаметр мишени.

Более общее рассмотрение взаимодействий в глубине атома золота позволяет видеть, что число ударов об экран изменяется как $1/(\sin^4\frac{A}{2})$ в соответствии с предсказанием.

Альфа-частицы, простреливающие лист золота, действуют как исследователи поля, показывая своими отклонениями, действие каких сил они испытали. В тонком листе большинство из них не может проходить очень близко от ядер, поэтому они отклоняются только на малые углы; некоторые проходят довольно близко и от-

Рассеяние альфа-частиц золотом
(Исследованное экспериментально Гейгером и Марсденом)

Экспериментальные данные		Проверка предсказаний теории	
угол отклонения *, $A°$	экспериментальное число отсчетов **, N	значение $1/\sin^4 \frac{A}{2}$ из таблиц	полученное значение $\frac{N}{1/\left(\sin^4 \frac{A}{2}\right)}$
150	33	1,15	29
135	43	1,38	31
120	52	1,79	29
105	69,5	2,53	28
75	211	7,25	29
60	477	16,0	30
45	1 435	46,6	31
30	7 800	233,3	33
15	120 570	3 445	35
10	502 570	17 330	29
5	8 289 000	276 300	30

* От первоначального направления движения альфа-частиц.

** Число сцинтилляций, наблюдавшихся за определенное, постоянное для всех опытов время, для заданного угла $A°$.

Примечание. В подлинных экспериментах Гейгер и Марсден проводили один ряд измерений для больших углов отклонения и другой ряд для малых углов отклонения с намного более слабым радиоактивным источником. Для получения единого ряда данных в приведенной выше таблице числа сцинтилляций для малых углов были умножены на соответствующий коэффициент.

Оригинальные данные можно найти в журнале *Philosophical Magazine*, **25**, 610 (1913), табл. II.

клоняются заметно, а редкие α-частицы отклоняются на большие углы, так как они оказались случайно нацеленными на область, очень близкую к ядрам золота. Таблица показывает результаты опыта. Такие результаты восхитили бы Кеплера. Совпадение отношений в последней колонке дает ясное свидетельство в пользу закона обратных квадратов, действующего в огромной области внутри атома золота.

Резерфорд мог даже оценить заряд ядер. Первые его расчеты указывали на атомный номер — порядковый номер элемента-рассеивателя в периодической системе. Уже «носилась в воздухе» идея, что этот порядковый номер, который численно составляет около половины атомного веса для легких элементов, должен играть большую роль в объяснении структуры атома. Казалось

возможным полагать, что число электронов в атоме составляет около половины числа, определяющего атомный вес. Исключение составлял водород, терявший только один электрон. Но уже гелий (масса гелия больше массы водорода в 4 раза) может легко терять два электрона; он не показывает никаких признаков возможности потерять большее их число. Была сделана попытка рассчитать число электронов в атоме углерода, заставляя его рассеивать рентгеновские лучи, вероятно, излучаемые при «вибрациях» атомных электронов. Рентгеновские лучи могли рассеиваться твердыми телами, и казалось вероятным, что «вибраторами», взаимодействующими с рентгеновскими лучами, были электроны. С трудом полученная округленная оценка числа электронов в атоме углерода дала значение около 6. Но количество электронов, вращающихся вокруг ядер в атомной модели Резерфорда, должно быть численно равно положительному заряду ядра Z. Резерфорд, таким образом, сделал предположение, что заряд ядра равен порядковому номеру элемента в периодической системе, его атомному номеру [1]. Это положение можно проверить, исследуя рассеяние альфа-частиц, так как константа K, входящая в предсказание, может быть рассчитана — все члены формулы, кроме Z, известны. Таким образом, наблюдение рассеяния альфа-частиц позволяет рассчитать значение Z. Было изучено рассеяние альфа-частиц тонкими листами меди, серебра, платины. Порядковые номера этих элементов в периодической системе или «атомные номера», равны 29, 47, 78. Изучение рассеяния α-лучей этими металлами дало значения Z, равные 29,3, 46,3, 77,4, с точностью в 1%.

Далее, мы можем рассчитать, насколько близко от ядра прошла альфа-частица, если мы уверены в приложимости закона обратных квадратов и знаем величину заряда ядра. Мы найдем, что хорошим приближением является 10^{-14} *м*, или 0,0001 Å. Это в 10 000 раз меньше оценки для размера атома (1 или 2 Å). Таким образом, представляется, что 9999/10 000 объема атома является пустым. (См. задачу 17 в гл. 33).

Итак, мы имеем ясную картину атома с крошечным массивным ядром, несущим положительный заряд, в Z раз больший, чем заряд

---

[1] Когда Бор создавал свою первую модель атома, Мозли попытался использовать ее для объяснения характеристических рентгеновских лучей, излучаемых ближайшими к ядру электронами. Он сделал смелое предсказание и провел серию превосходных измерений с различными мишенями, составленными в виде миниатюрного поезда, протаскиваемого перед пучком электронов в вакууме. Так неожиданно появились первые оценки зарядов ядер для многих элементов.

электрона, и Z электронами, вращающимися вокруг ядра на большом расстоянии от него. Атом водорода имеет $Z=1$, ядро с единичным положительным зарядом и один электрон; атом гелия с $Z=2$ имеет ядро с зарядом «++» и два электрона и т. д. Отдавая свой электрон, атом водорода превращается в ион водорода H^+, который мы сейчас называем *протоном*. Отдавая два свои электрона, атом гелия превращается в альфа-частицу, He^{++}. (Не удивительно, что испускаемая альфа-частица — гелий без электронов — имеет ровно два «+»заряда.) Другие атомы при образовании ионов обычно теряют только один или два электрона из многих.

Картина, представляющая атом в виде миниатюрной солнечной системы, оказалась слишком упрощенной. Последующие исследования показали, что электроны *не* вращаются по планетарным эллиптическим орбитам и не разложены по орбитам с такой точностью, как предметы по полочкам у хорошей домохозяйки. Ранняя модель атома содержала слишком много ненаблюдаемых деталей, хотя рассеяние альфа-частиц и дало ясную информацию о том, что атом является почти пустым образованием с маленьким, массивным, положительно заряженным ядром, создающим вокруг себя электрическое поле, убывающее обратно пропорционально квадрату расстояния и действующее на больших расстояниях в пределах области, определяемой размерами атома, найденными ранее. Картина атома, данная Резерфордом, была явно незаконченной, требовались дальнейшие теоретические рассмотрения и дальнейшие исследования. Теоретические рассмотрения, начатые Бором, привели к новой теории, к которой мы и обратимся.

Задачи к главе 40

Задача 1

а) *Какие очевидные экспериментальные факты убеждают нас, что гравитационное поле Солнца подчиняется* закону обратных квадратов *в большой области, простирающейся от 57 600 000 до 44 800 000 000 км?*

б) *Какие наблюдения можно сделать (случайно) для расширения области исследования гравитационного поля Солнца* в сторону уменьшения и увеличения *границ, указанных в а)?*

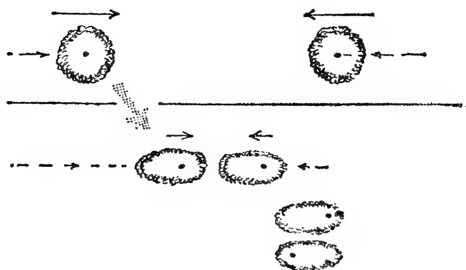
в) *Какие эксперименты показывают, что взаимодействие атомного ядра (например, ядра атома золота) с внешними электрическими зарядами подчиняется* закону обратных квадратов?

г) *Какие другие сведения об атомном ядре дают эксперименты, о которых говорится в в)?*

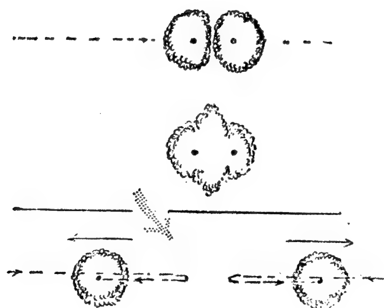
Задача 2. СВЯЗЬ РАССЕЯНИЯ АЛЬФА-ЧАСТИЦ С ИХ СКОРОСТЬЮ

Если вы не решили задачу 3 в гл. 18, вы можете проанализировать условия этой задачи снова, используя более новые знания, полученные при изучении этой главы.

Столкновения молекул



Когда две нейтральные молекулы (или два атома) налетают друг на друга, то при сближении происходит их поляризация (небольшое смещение разноименных зарядов в противоположные стороны). Благодаря этому между молекулами возникает слабое притяжение (притяжение разноименных зарядов эффективнее отталкивания одноименных).

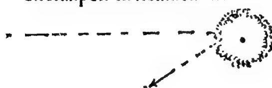


При более тесном сближении системы электронов в атомах начинают сплющиваться, оказывая сопротивление сближению (принцип Паули, глава 44). Электроны могут перейти на орбиты, охватывающие оба атома. При этом возникает сильное отталкивание между атомами за счет кулоновского взаимодействия ядер. Тогда атомы разлетаются со своими первоначальными кинетическими энергиями.

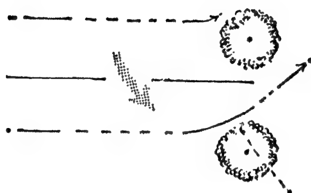
Фиг. 67. Картина атомных и ядерных столкновений.

Эти рисунки, условно отражающие некоторые детали атомной структуры, иллюстрируют подлинные атомные события.

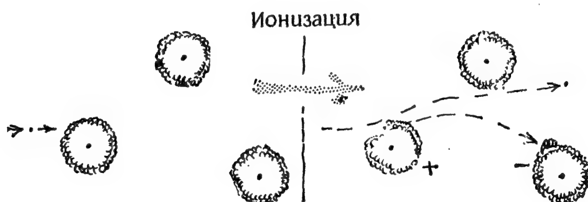
Электрон налетает на атом



Медленный электрон (например, с энергией $^1/_2$ *эв*) не может вызвать каких-либо изменений в атоме. Он упруго отскакивает от массивного атома.



Однако более быстрый электрон (например, с энергией 100 *эв*) может выбить у атома электрон (за счет своей кинетической энергии). Выбитый электрон блуждает до тех пор, пока не захватывается другим атомом, образуя из него отрицательный ион.



Электроны, проходя близко от атомов, выбивают из них электроны, превращая их в положительные ионы. Выбитые электроны могут присоединяться к другим атомам, превращая их в отрицательные ионы. Если положительные и отрицательные ионы не развести в разные стороны электрическим полем, то они вскоре могут встретиться и нейтрализовать друг друга.

Фиг. 67 (продолжение).

α-частица налетает на атом

Проходя близко от атома или через его внешние области, α-частица легко вытягивает из него электрон своим электрическим полем. Электрон, блуждая, может быть захвачен атомом, и образуется отрицательный ион. α-частица проскакивает мимо, практически не отклоняясь.

Много α-частиц налетает на атом



Одна из α-частиц, подойдя близко к ядру, отклоняется им на большой угол. Большинство же проходит прямо, не отклоняясь.

Атом, увеличенный в 50000000 раз

х10

R

Ядро

Облако внешних электронов

х 1000

R

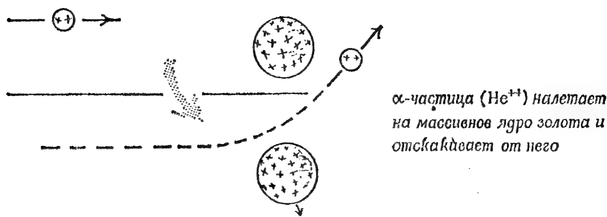
Ядро

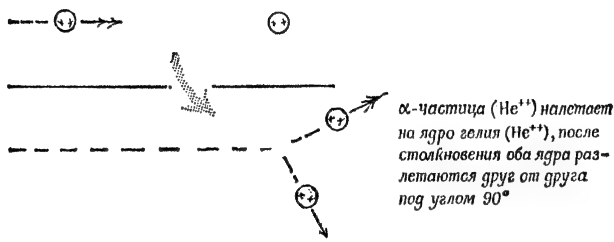
В этом масштабе внешние электроны были бы за 30 метров от этой страницы

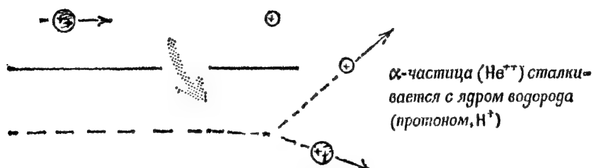
Ядра атомов, изображенные ниже на рисунках, увеличены в 500 миллиардов раз

Фиг. 67 (продолжение).

Упругие столкновения ядер



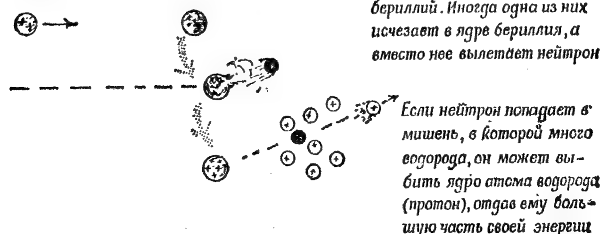




Неупругое столкновение – редкое явление



Открытие нейтронов



Фиг. 67 (продолжение).

ГЛАВА 41 • ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО ИЗУЧЕНИЮ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОНОВ: ОТ ГЕНЕРАТОРОВ ДО ОСЦИЛЛОГРАФОВ

Sine experientia nihil sufficienter sciri potest
Без опыта нет достоверного знания.

Роджер Бэкон (~1250 г.)

Об опыте, духовном и практическом.

...прививайте любовь к наблюдению и исследованию явлений природы—главную движущую силу научной деятельности. Если эта любовь есть, научное творчество и прогресс неотделимы, если ее нет, научное творчество, даже скрупулезно «взращиваемое», бесплодно. Студента нужно учить так, чтобы лицом к лицу с задачами он чувствовал себя истинным исследователем, в значительной степени предоставленным самому себе, готовым вырвать у природы ответы на вопросы, которые он ей задает.

Сэр Перси Нунн
(«Новое преподавание», ~1918 г.)

Как генераторы «создают ток»? Почему энергию дешевле передавать с помощью переменного тока? Каковы основные детали радиоприемников, усилителей, телевизионных трубок ... и как они работают? И как мы изучаем свойства электронов в этой «аппаратуре»? Эти вопросы, характерные для нашего века электричества, выходят за рамки «домашнего электричества», изложенного в гл. 32, и для того, чтобы на них можно было ответить, необходимы дополнительные сведения. Хороший курс физики должен содержать ясные ответы на некоторые из них, но это невозможно сделать только с помощью простых картинок и занимательных историй. Вместо этого вам предлагается самим найти ответы, уяснив некоторые из опытов, изложенных в настоящей главе. Проделайте опыты сами либо посмотрите, как их демонстрируют, либо пропустите эту главу.

Опыт 1. *Катапультирующая сила.* Соберите цепь, в которой через гибкий провод, висящий поперек магнитного поля, протекает сильный постоянный ток. Вместо провода можно использовать подвешенную металлическую трапецию с перекладиной поперек поля. Наблюдайте

за действием катапультирующей силы. (Сила будет казаться слабой. Чтобы ощутить эту силу в большем масштабе, схватите рукой вал электри-

Опыт 3. *Опыты с магнитами и катушками.* (Это целая серия опытов с объяснениями к ним. Сделайте их сами, изучив объяснения.)



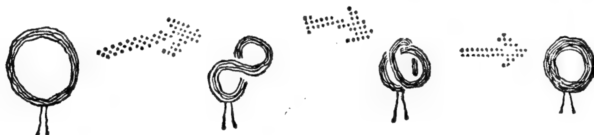
Фиг. 68. Катапультирующая сила.

ческого мотора и попробуйте остановить его вращение.)

Опыт 2. *Сила, действующая на электроны.* Направьте пучок электронов поперек магнитного поля. Для этого поднесите магнит к катодно лучевой трубке осциллографа. Посмотрите, как действует сила на пучок, и зафиксируйте его отклонение. Поднесите тот же магнит к гибкому проводу, по которому течет ток в известном направлении (опыт 1), и сравните его отклонение с отклонением пучка катодных лучей. Доказывает ли это, что катодные лучи представляют собой поток отрицательных зарядов?

Опыт 3(а). *Предварительные опыты с магнитами и катушками.* Подсоедините маленькую катушку из изолированного провода (скажем, из 40 витков) к чувствительному микроамперметру [1]. Так как в этой цепи нет батареи, тока в цепи не будет. Если, однако, каким-либо образом в катушке создается напряжение, оно возбуждает ток через прибор. Попробуйте сделать следующее:

1) Ввести N-полюс постоянного магнита в катушку. Отметьте направление и амплитуду отклонения стрелки амперметра. Удалите магнит и заметьте отклонение.
2) Повторите пункт 1) с S-полюсом.
3) Повторите пункт 1) с двойным



Фиг. 69. Подготовительный опыт с магнитами и катушками.

Удваивайте число витков в катушке, скрутив ее вначале в виде восьмерки, а затем сложив так, как показано на рисунке.

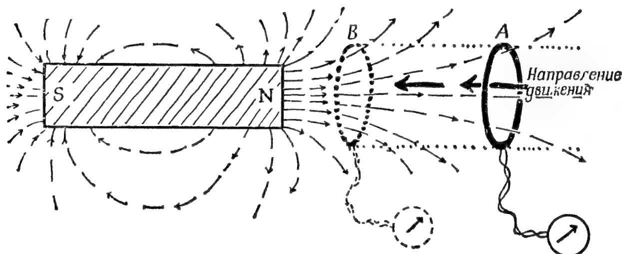
[1] Раньше примитивный амперметр назывался «гальванометром». Теперь это название используется для любого чувствительного прибора, предназначенного для регистрации или измерения малых токов. Современный термин для обозначения тех же приборов — «микроамперметр».

числом витков. (Скрутите вдвое катушку так, как показано на фиг. 69.)

4) Наденьте катушку на полюс подковообразного магнита. Снимите ее.

Магниты и катушки. Теоретическая интерлюдия

В предыдущих опытах измерительный прибор показывал слабый ток всякий раз, когда магнит двигался вблизи катушки. Ток возникал благодаря напряжению, «наведенному» при движении магнита. По-видимому, необходимым условием возникновения тока



Фиг. 70. Катушка и магнитные силовые линии.

При движении катушки относительно магнита она пересекает силовые линии магнитного поля, и поэтому полное число магнитных силовых линий, пронизывающих катушку, меняется.

является либо движение магнита, либо какие-нибудь другие изменения магнитного поля. Катушка сама по себе не может знать, как ведет себя магнит; она узнает о его движении только по изменению магнитного поля. Предположим, что катушка подносится к магниту из положения A в положение B, как показано на фиг. 70. При движении в катушке наводится напряжение, которое вызывает в ней ток, причем «с точки зрения катушки» происходит какое-нибудь одно из следующих изменений:

1) либо провода катушки пересекают силовые линии магнитного поля, что на рисунке отмечено разрывами на силовых линиях в тех точках, где катушка пересекла их,
2) либо меняется полное число силовых линий, пронизывающих катушку.

Если подумать, то станет ясно, что 1) и 2) означают одно и то же: число линий, пронизывающих катушку, не может меняться, если катушка не пересекает силовых линий.

Открытие Фарадея

Опыты по изучению этих индукционных эффектов были начаты около 100 лет назад Майклом Фарадеем и Джозефом Генри. Они пришли к общему выводу, что, *когда провод пересекает силовые линии магнитного поля или меняется число силовых линий, пронизывающих электрическую цепь с этим проводом, всякий раз в проводе возникает наведенная э. д. с. , стремящаяся вызвать в нем ток.* Если цепь замкнута, то течет ток. Именно этот ток заставляет отклониться стрелку прибора. Если же цепь разорвана, то тока нет, но можно показать, что при этом напряжение в цепи тем не менее существует. Обычные микровольтметры на самом деле представляют собой-микроамперметры, пропускающие ток. Поэтому последнее утверждение невозможно проверить в столь малом масштабе. Однако для проверки его в большом масштабе существует устройство, в котором в сильном магнитном поле быстро движется большое число витков провода — не что иное, как большой генератор! Соединив работающий генератор с хорошим вольтметром, можно убедиться, что наведенное напряжение действительно есть. Это напряжение есть не что иное, как э. д. с. генератора.

В 1820-х гг. пришло время, когда это открытие созрело. Ампер и Эрстед искали его (но не поняли, что все дело заключается в движении магнита), и Фарадей в Англии, и Генри в Америке пытались «превратить магнетизм в электричество». В 1832 г. они оба провозгласили об открытии того, что теперь называется *электромагнитной индукцией*.

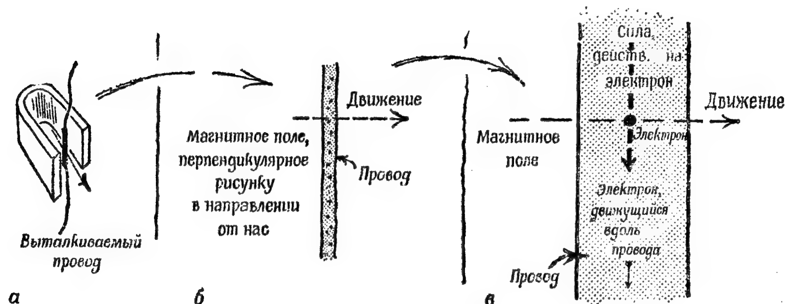
Подобно вашей работе с «магнитами и катушками», их простые опыты, казалось бы, страшно далеки от современных мощных энергосистем, но они открыли принцип, на котором основаны сегодняшние генераторы. Тот же принцип существен для электромоторов: во вращающихся катушках моторов поля магнитов наводят «обратную э. д. с.», которая ограничивает силу тока и позволяет моторам выдерживать большие нагрузки.

Понаблюдайте, как увеличивается ток через мотор, работающий на постоянном токе, когда нагрузка на мотор возрастает. Добавление нагрузки немного его замедляет, но тогда «обратная э. д. с.» становится меньше, ток, обусловленный внешним напряжением, возрастает, а это приводит к увеличению силы и подхватыванию мотором возросшей нагрузки.

Мы не будем касаться устройства генераторов, но вам следовало бы посмотреть на работу простого генератора постоянного тока: вращающуюся катушку с коллектором, обеспечивающим выпрямление генерируемого в катушке переменного тока.

Объяснение с помощью электронной теории

Электронная теория позволяет просто понять, что такое наведенное напряжение. Представим себе металлический провод, содержащий облако свободных электронов, способных переносить ток. Когда провод движется поперек магнитного поля, вместе с ним движутся его свободные электроны, причем тоже *поперек* поля. Каждый движущийся электрон создает электрический ток, направленный *поперек* поля. Поэтому можно ожидать, что каждый электрон испытывает действие отклоняющей силы, перпендикулярной направлению движения и поля. Следовательно, сила направлена *вдоль провода*. Эта сила, действуя на электроны, толкает их вдоль провода, создавая э. д. с., стремящуюся вызвать ток точно так же, как если бы это была батарея. Таким образом, считается, что э. д. с. индукции обусловлена силами, действующими на свободные электроны при движении их поперек магнитного поля [1].



Фиг. 71.

---

[1] По величине указанной силы можно предсказать истинную величину наведенного напряжения в полном согласии с экспериментом. Набросаем в общих чертах схему вывода.

Если провод движется вбок со скоростью v *м/сек*, то электрон с зарядом в e *кулон* испытывает действие силы $F=10^{-7}\ evH$, где H — магнитное поле $(=I_2\cdot 2\pi N/R)$ в центре кольца из провода. Поэтому напряженность созданного *электрического поля* равна

$$X=\frac{\text{СИЛА}}{\text{ЗАРЯД}}=\frac{10^{-7}evH}{e}=10^{-7}vH.$$

(Положительные заряды отклоняются силой в противоположную сторону: на них действует та же э. д. с., приводя их в движение, *если* они свободны.)

Закон Ленца

В какую сторону течет индукционный ток? Чтобы ответить на этот вопрос, следовало бы проделать опыт с движущимся магнитом и катушкой и сравнить направление отклонения стрелки прибора с тем, которое наблюдается при прохождении через него *известного* тока. При этом вы обнаружили бы, что в каждом случае индуцированный ток течет через катушку (или прямой провод) в таком направлении, что создаваемое самим током магнитное поле препятствует вызванному изменению поля, т. е. если магнит приближается к катушке, то ток в ней создает магнитное поле, отталкивающее магнит, если же магнит удаляется от катушки, то ток заставляет катушку притягивать его; если же катушка вращается и, следовательно, меняется число пронизывающих ее силовых линий магнитного поля, то ток создает поле, препятствующее вращению. Эффекты, вызванные индукцией, всегда противятся изменениям, вызывающим их. Это «инерция» движения в более общей формулировке. Она называется законом Ленца в честь Эмилия Ленца, сформулировавшего его. В справедливости этого закона

Пусть L — длина движущегося провода, а E — э. д. с., наведенная во всем проводе. Тогда (как показано в гл. 33)

$$\text{НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ } X = \frac{\text{РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ}}{\text{РАССТОЯНИЕ}} = \frac{E}{L},$$

$$E = XL = 10^{-7}vHL.$$

Но vL есть не что иное, как площадь, пересекаемая проводом в единицу времени.

$$E = 10^{-7} \cdot H \cdot (\text{ПЛОЩАДЬ, ПЕРЕСЕЧЕННАЯ ЗА ОДНУ СЕКУНДУ}).$$

Если величину магнитного поля характеризовать числом силовых линий, пронизывающих единицу площади, то (H) (ПЛОЩАДЬ) равно числу пересеченных линий

$$E = 10^{-7} \cdot (\text{СКОРОСТЬ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ЛИНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ}).$$

Это и есть наведенная э. д. с.. Более строгое рассмотрение показывает, что она должна быть со знаком минус (закон Ленца):

$$E = -10^{-7}\frac{dn}{dt},$$

где dn/dt означает либо СКОРОСТЬ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ЛИНИЙ ПОЛЯ H, либо СКОРОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ЧИСЛА ЛИНИЙ n, ПРОНИЗЫВАЮЩИХ ЦЕПЬ.

можно убедиться на опыте или же, если вы верите в закон сохранения энергии, вывести из него. Когда цепь разомкнута, тока индукции нет, зато есть э. д. с. индукции, которая действует в том направлении, в котором протекал бы ток, *если бы* цепь была замкнута.

Отрицательный магнетизм: универсальный диамагнетизм

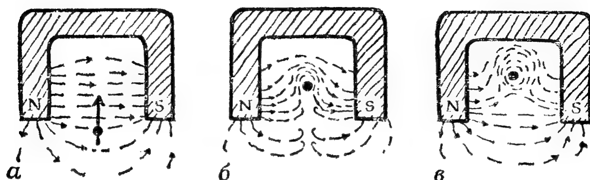
Теперь можно пролить свет на упомянутый в гл. 34 «отрицательный магнетизм», свойственный всем веществам. Каждый электрон, описывающий нечто вроде «орбиты» вокруг атомного ядра, эквивалентен крошечной электрической цепи. Когда мы включаем внешнее магнитное поле, его силовые линии, пронизывая орбиту электрона, наводят в ней э. д. с., которая ускоряет или замедляет электрон таким образом, *чтобы препятствовать возрастанию магнитного поля в области орбиты*. Тогда до тех пор, пока приложено внешнее магнитное поле, движение электрона по орбите остается измененным. (Магнитный вклад электронных *спинов*, однако, остается неизменным.)

Следует ожидать, что все электронные орбиты атомов должны участвовать в этом сопротивлении (т. е. ослаблении воздействия) — все вещества должны отталкиваться магнитом, правда очень слабо. Этот «диамагнетизм» маскируется положительным эффектом в таких атомах, как железо и кислород, электроны которых создают направленное вдоль приложенного извне результирующее магнитное поле, складывающееся с ним. Железо и кислород притягиваются магнитом. Но в веществах, состоящих из немагнитных атомов (у которых спины и орбиты компенсируют друг друга в магнитном отношении), диамагнетизм проявляется в качестве единственного магнитного свойства вещества.

Картина силовых линий

Если угодно, можно представить себе провод, который при движении тянет за собой силовые линии магнитного поля и вытягивает их на некоторое расстояние, пока они не порвутся. Эта воображаемая картина дает возможность понять существование и направление реального индукционного тока. Например, когда провод, направленный перпендикулярно рисунку, движется вверх в поле подковообразного магнита, как показано на фиг. 72, *а*, можно представить себе, что за проводом тащится часть силовых линий, подобно гирляндам, как показано на фиг. 72, *б*. Если добавить

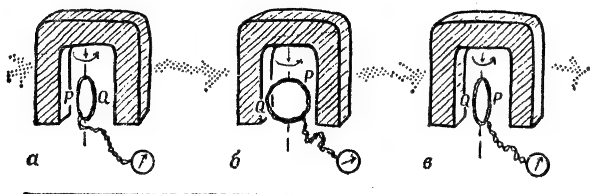
немного деталей, нарисовав фиг. 72, *в*, то получится поле, которое было бы, если бы по самому проводу тек ток. Этот предполагаемый ток *есть* не что иное, как ток индукции, если есть он один. Согласно картине суммарного поля, провод должен двигаться *вниз*. Предсказанный фиг. 72,*в* наведенный ток препятствует первоначальному движению провода.

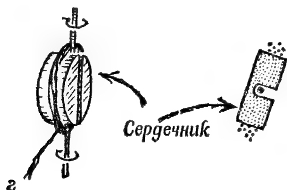


Фиг. 72. Провод, движущийся поперек силовых линий магнитного поля. (Воображаемая картина механизма возникновения индукции.)

Опыт 3(б). Продолжая ранее проведенные опыты, присоедините катушку к микроамперметру и начните вдвигать в нее и выдвигать из нее один из полюсов подковообразного магнита. Можете ли вы сказать в свете проведенного выше рассмотрения, почему при этом возникает переменный ток?

Опыт 3 (в). Поместив катушку между полюсами подковообразного магнита и двигая ее, можно изменять число пронизывающих катушку силовых линий. Сделайте это. Перемотайте катушку так, чтобы она могла поместиться в пространстве между полюсами подковообразного магнита, и начните вращать ее (фиг. 73). Полу-





Фиг. 73. К опытам 3 (в) и 3 (д).

чится простейший генератор переменного тока. Обратите внимание на то, что когда катушка находится в положении *а*, то ее пронизывает, скажем, 100 магнитных силовых линий, в позиции *б* — нуль, а в позиции *в* — 100 линий. Изменение числа линий при переходе от позиции *а* к *в* равно — 200 линиям; *скорость же изменения максимальна* в позиции *б*.

Очевидным недостатком примитивного генератора в опыте 3 было то, что провода от катушки все больше и больше скручивались по мере ее вращения. В настоящих генераторах это устраняется путем соединения катушки с двумя «скользящими кольцами», которые вращаются вместе с катушкой и трутся о неподвижные металлические «щетки», связывающие их с внешней цепью. Пронаблюдайте это.

Опыт 3(г). Вращение проводов можно заменить вращением магнита. Сделайте это. Такое устройство используется во многих современных больших генераторах переменного тока.

Опыт 3 (д). *Генератор с железным сердечником в катушке.* Найдите маленький железный сердечник и поместите его внутрь катушки, пропустив через отверстие в нем медную ось и прилепив ее воском. Повторите опыты 3(в) или (г), сравнив при этом результаты, полученные без сердечника и с ним.

Опыт 3 (е). *Другая постановка опыта* 3(д). Вместо специального сердечника воспользуйтесь бруском мягкого железа, который служит «башмаком» вашего подковообразного магнита. Наденьте катушку на «башмак» и поднесите ее близко к магниту. Попробуйте вращать «башмак». Вместо этого попробуйте вращать магнит.

Опыт 3(ж). Как в 3(е), наденьте катушку на «башмак» подковообразного магнита. Поднесите «башмак» близко к полюсам магнита, а затем подвигайте его в разные стороны от магнита. Повторите опыт, надев катушку на один из полюсов магнита. Это демонстрирует принцип действия наушника *телефонной трубки*, если его, как это делали раньше, использовать в качестве микрофона.

Трансформаторы

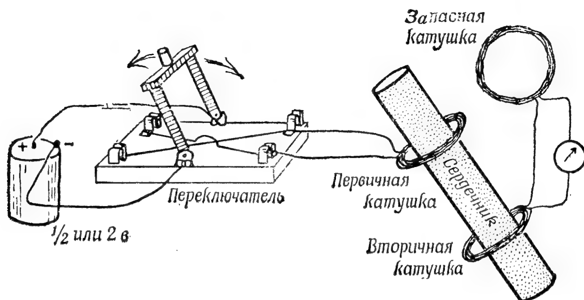
Вместо магнита поднесите к катушке другую катушку. Когда по катушке течет ток, она действует как магнит, и можно убедиться, что она действительно действует на первую катушку подобно магниту. Вместо того чтобы подносить катушку с током, можно просто включать мгновенно в ней электрический ток. Магнитную связь между катушкой с током и катушкой, в которой мы хотим индуцировать токи, можно усилить, продев через обе катушки брусок из мягкого железа.

Опыт 3 (з). Так же как и ранее, подключите катушку к амперметру. Чтобы увеличить число витков цепи с 40 до 80, не меняя сопротивления в ней, соедините последовательно две такие катушки (фиг. 74). Эти две катушки будут образовывать «вторичную обмотку», в которой вы предполагаете наводить токи. Теперь вместо магнита воспользуйтесь «первичной обмоткой», подсоединенной к батарее со специальным переклю-

чателем, при помощи которого можно включать и выключать ток как в прямом, так и в противоположном направлениях [1].

С помощью этого переключателя пустите «переменный» ток через первичную обмотку. Придвиньте первичную катушку близко к вторичной и увеличьте связь между ними с помощью «сердечника» из мягкого железа. Запишите показания микроамперметра, подключенного ко вторичной катушке из 40 витков, затем из 80. Чтобы сопротивление было постоянным, обе катушки все время должны быть соединены последовательно. Обратите внимание на то, что 80-витковую катушку можно сделать двумя путями: соединить катушки по 40 витков один раз так, чтобы они были намотаны в одну сторону, а другой раз — в разные стороны.

Такое устройство представляет собой простейший трансформатор.



Фиг. 74. Опыт 3 (з): простейший трансформатор.

Изображена одна из разновидностей переключателя. Какой бы вам ни попался в руки переключатель, исследуйте его и, руководствуясь соображениями здравого смысла, попытайтесь найти подходящий способ его применения. Это тест на сообразительность.

Трансформаторы. Дальнейшее обсуждение

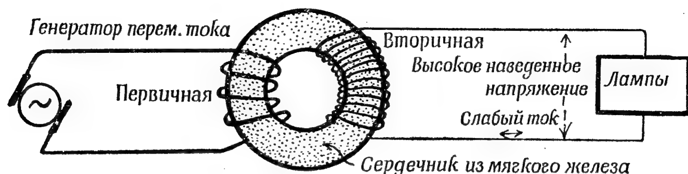
Трансформатор состоит из двух изолированных друг от друга катушек, намотанных на железный сердечник. Для осуществления магнитной связи между катушками вполне годится простое кольцо из мягкого железа. При колебаниях тока в одной катушке кольцо периодически намагничивается, сначала по часовой стрелке, за-

[1] Такой переключатель может показаться сложным. Если хотите, исследуйте его детально или же поверьте нам на слово, что такой переключатель получится, если соединить

провода от батареи со средними клеммами рубильника,
провода от первичной катушки с парой крайних клемм рубильника,
вторую пару крайних клемм соединить накрест с первой парой крайних клемм.

тем против часовой стрелки, снова по часовой и т. д. В другой катушке при этом наводится переменное напряжение.

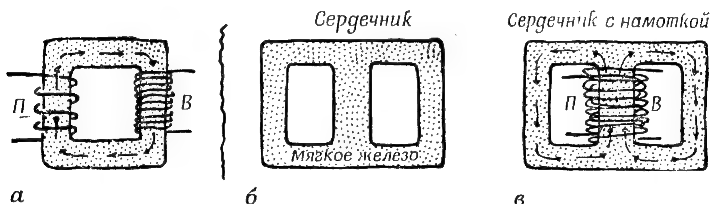
Наматывая все большее и большее число витков во второй катушке (вторичной), можно получать все более и более высокое



Фиг. 75. Применение трансформатора.

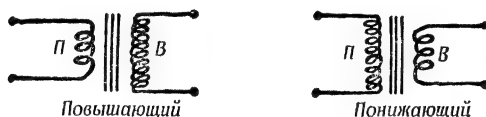
Первичная обмотка состоит из нескольких витков толстого провода, вторичная — из большого числа витков тонкой проволоки.

напряжение, вольт за вольтом, пропорционально числу намотанных витков. У повышающего напряжение трансформатора первичная обмотка состоит из небольшого числа витков толстой про-



Фиг. 76. Устройство трансформаторов.

волоки, а вторичная — из большого числа витков тонкой. Тогда низкое переменное напряжение, приложенное к первичной обмотке, вызывает в ней сильный переменный ток, который наводит



Фиг. 77. Символы для обозначения трансформаторов в цепях.

высокое переменное напряжение во вторичной обмотке. На основании закона сохранения энергии следует ожидать, что со вторичной обмотки должна сниматься точно такая же (или меньшая)

мощность, какая подведена к первичной. Поэтому во вторичной обмотке высокому напряжению должен отвечать слабый ток. Сердечники трансформаторов имеют самую различную форму, чаще всего форму двойного кольца, изображенного на фиг. 76,*б*, на центральную стойку которого намотаны обе катушки. Стрелки изображают направление намагниченности в сердечнике в некоторый произвольный момент времени. На электрических схемах трансформаторы изображаются символами, такими, как на фиг. 77, причем катушки изображаются в виде спиралек из проводов — катушек старинной формы.

Опыт 4. *Трансформатор.* (Сделайте опыт сами или посмотрите его.) Возьмите U-образный сердечник и прямой брусок для замыкания его концов [1]. Наденьте на одну из стоек сердечника катушку из большого числа витков провода — это будет первичная обмотка и намотайте на вторую стойку немного витков изолированного провода — это будет вторичная обмотка. Замкните концы сердечника бруском. Подключите первичную обмотку к сети переменного напряжения в 120 *в*. Подключите ко вторичной обмотке 6-вольтовую лампочку. Если она горит тускло, добавьте во вторичную обмотку несколько витков.



Фиг. 78. Опыт 4. Самодельный трансформатор.

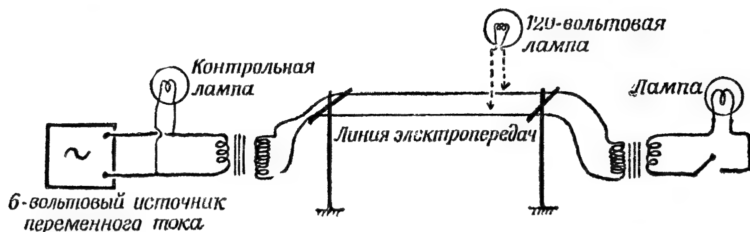
Опыт 5. *Модель линии электропередачи переменного тока.* Используйте модель линии передачи постоянного тока (6 *в* и затем 120 *в*), которая была в опыте 23 гл. 32. Пусть роль «электростанции» вначале будет играть источник переменного напряжения в 6 *в*. Воспользуйтесь сначала этим источником для соединения низковольтной линии передачи без трансформаторов. Включите одну 6-вольтовую лампочку на «электростанции», а другую такую же — в «деревне», на самом дальнем конце линии передачи. Убедитесь, что низковольтная система на переменном токе рабо-

[1]) Они сделаны из штампованных тонких листов железа в форме U и I. Чтобы избежать потерь из-за «вихревых токов», которые возникают в литом сердечнике, сердечники всех трансформаторов сделаны из тонких листов. Сам сердечник представляет собой «вторичную обмотку», но только в виде целого блока, а не большого числа витков. До тех пор пока он не разбит на множество тонких листов, малые напряжения вызывают в нем громадные переменные циркулирующие токи, выделяющие большое количество тепла.

тает столь же плохо, как аналогичная система на постоянном.

Затем около «электростанции» поставьте маленький трансформатор, повышающий напряжение, а возле «деревни» — понижающий. (Для этого воспользуйтесь трансформаторами от электрических звонков или теми, которые работают в сети накала радиоламп. В этих трансформаторах числа витков в обмотках отличаются в 20 раз, причем катушка с малым числом витков сделана из толстой проволоки.)

Запишите ваши наблюдения. Эти измерения нельзя сделать без специального амперметра для переменного тока. Однако в качестве индикатора высокого напряжения можно воспользоваться электрической лампочкой на 120 *в*.



Фиг. 79. Опыт 5. Модель линии электропередачи переменного тока.

Переменный ток и передача энергии

Для эффективной передачи электрической энергии необходимо использовать высокое напряжение. Для безопасной работы с машинами и моторами на концах линий передачи необходимо иметь низкое напряжение.

Низковольтные линии передачи совершенно неэкономичны, если только они не сделаны из очень толстого провода, обладающего малым сопротивлением. Протяженные линии из таких тяжелых проводов были бы страшно дороги как из-за дороговизны металла, так и из-за высокой стоимости опор для поддерживания проводов. Эффективное решение — переменный ток плюс трансформаторы.

Трансформаторы обладают двумя крупными достоинствами:

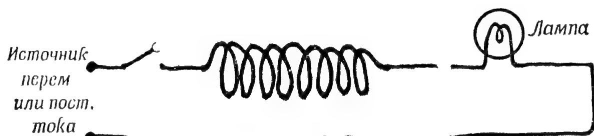
1) они весьма эффективны — мощность на выходе может составлять до 95% от мощности на входе, т. е. всего лишь 5% потерь на тепло;
2) они не требуют за собой наблюдения — работающий мотор плюс генератор для преобразования постоянного напряжения требуют гораздо большего внимания и обслуживания. Поэтому всюду, где желательно эффективно менять напряжение, используются переменные токи и трансформаторы.

Для передачи электроэнергии внутри города на линии передачи подается переменное напряжение в несколько тысяч вольт, а для передачи от мощных электростанций в города, расположенные от них на большом расстоянии, подается переменное напряжение до миллиона вольт.

Опыт 6. *«Электромагнитная инерция».* Когда ток, протекающий по мотку провода, меняется, то меняется также и напряженность создаваемого им магнитного поля. Это переменное поле индуцирует в самом витке напряжение, препятствующее этому изменению. Следовательно, каждая катушка обладает «самоиндукцией», ослабляющей изменение тока. Такое поведение напоминает свойство любого куска вещества двигаться по инерции, оказывая сопротивление изменению его скорости. Если внутри катушки помещен железный сердечник, то эффект еще сильнее.

Подключите лампочку к источнику постоянного напряжения. Попробуйте добавить в цепь большую проволочную катушку, кроме увеличения сопротивления, включение катушки никак не влияет на работу лампочки. Теперь, заменив постоянное напряжение таким же по величине, но переменным напряжением, попробуйте включить лампочку сначала без катушки, а затем с последовательно включенной катушкой. Попробуйте в катушку всунуть железный сердечник.

Если со вторичной обмотки не снимается мощность, то первичная обмотка трансформатора обнаруживает большую самоиндукцию. Поэтому ток в первичной обмотке намного меньше того, который был бы при постоянном напряжении — это одна из причин, почему в трансформаторе не происходит потерь энергии.



Фиг. 80. Опыт 6. «Электромагнитная инерция (масса?)».

Проволочная катушка оказывает сопротивление любому изменению тока. Это противодействие (мгновенное появление напряжения противоположного знака) становится во много раз больше, если в катушке есть железный сердечник. При постоянном токе катушка никак не влияет на работу лампы, за исключением разве того, что она создает дополнительное сопротивление. В случае же переменного тока это влияние на работу лампы весьма заметно.

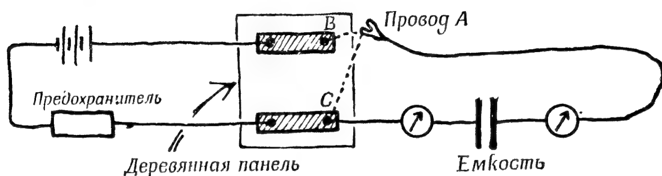
Катушка (обычно с железным сердечником), которая используется ради ее самоиндукции, называется индуктивностью или «дросселем». Дроссельные катушки вместе с емкостями используют для того, чтобы сглаживать скачки напряжения в усилителях.

Опыт 7 (а). *Емкость.* (Этот опыт не находится в прямой взаимосвязи с «магнитами и катушками», но приводится здесь, поскольку емкости используются в цепях переменного тока и в радиоприемниках.)

Емкость (старое название — «конденсатор») состоит из двух

металлических пластин, отделенных друг от друга слоем диэлектрика. Часто она изготовляется наклеиванием тонкой металлической фольги на обе стороны листа вощеной бумаги. Затем, проложив еще один лист вощеной бумаги, всю конструкцию скручивают в трубку и помещают в защитную оболочку. Вам следует воспользоваться маленькой емкостью такого рода. Каждый вывод текать с пластины на пластину каким-то другим образом. Исследуйте, как это происходит, используя цепь, изображенную на фиг. 81.

Соедините батарею (через предохранитель) с клеммами B и C, расположенными на деревянной панельке. С каждой стороны электрической емкости включите по микроамперметру. Полная схема цепи изображена на рисунке.



Фиг. 81. Зарядка емкости.

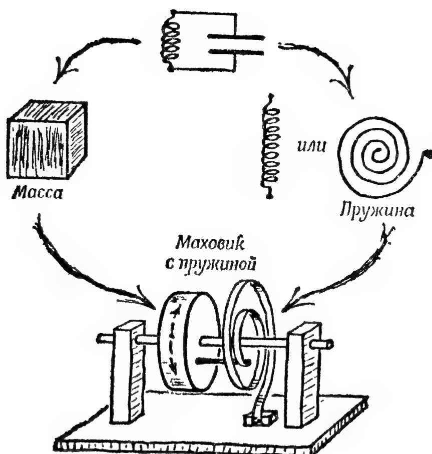
Для зарядки емкости соедините конец A провода с клеммой B. Для разрядки ее соедините A с C.

на оболочке соединен со своей металлической пластиной. Такого рода емкости часто используются в радиотехнике. Будучи соединенными с батареей, пластины приобретают заряды «+» и «—», а между пластинами при этом возникает электрическое поле. Таким образом, на пластинах запасается заряд. Емкость не может проводить ток, так как пластины разделены изолятором. Следовательно, заряды должны пере-

Микроамперметры должны показать вам, возникает ли мгновенный ток, когда вы заряжаете емкость, соединяя клемму A с B. Затем можно отключить батарею и, замкнув цепь, «разрядить» емкость. Проделайте это, соединив провод A с клеммой C. (Простейший способ: держа провод A в руке, коснитесь им сначала B, затем C, потом снова B, ...) Повторите опыт с напряжением в 4 *в* вместо 6 *в*, а затем в 2 *в*.

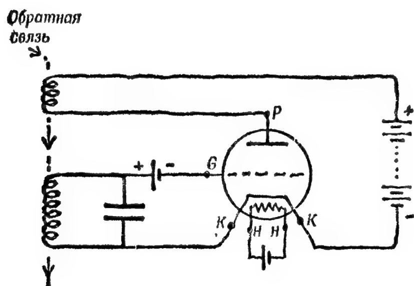
Электрическая упругость. Колебания

Емкость в электрической цепи подобна пружине в механическом устройстве. Емкость, соединенная с катушкой индуктивности, подобна пружине с подвешенным к ней грузиком. Нагруженная пружина может совершать простые гармонические колебания (см. гл. 10). Аналогичное поведение обнаруживает комбинация емкость + катушка: токи через катушку могут испытывать простые гармонические колебания, заряжая пластины конденсатора до напряжения, осциллирующего по простому гармоническому закону. Такие «колебательные контуры» нужны в радиотехнике для излучения и приема радиоволн. Мы не будем изучать их в этом курсе.



Фиг. 82. Аналогия между цепью колебательного контура и массивным маховиком с пружиной.

Замечание. Электрическая катушка индуктивности аналогична массе, а не скрученной пружине.



Фиг. 83. Колебательный контур, управляющий лампой — усилителем с обратной связью для поддержания осцилляций.

Опыт 7 (б). *Емкость как фильтр переменного/постоянного тока.*

Попробуйте включить емкость последовательно в цепь с электрической лампочкой, питаемой вначале от постоянного напряжения, а затем от переменного. Источник постоянного тока заряжает пластины конденсатора мгновенно, так же как и в 7(а). Если емкость его велика, лампочка моментально вспыхнет, как только импульс заряжающего тока пройдет через нее. После этого уже нет тока и лампочка не горит.

Если же напряжение переменное, то ток через лампочку будет течь все время, в результате чего

она будет ярко гореть. На самом деле ток течет не *через* емкость [1], а благодаря колебаниям напряжения перетекает от одной пластины к другой и обратно. При этом заряды на пластинах емкости и электрическое поле между ними меняются:

от НУЛЯ до $^{+}$«МАКСИМУМА»$^{-}$
через НУЛЬ до $^{-}$«МАКСИМУМА»$^{+}$
через НУЛЬ до $^{+}$«МАКСИМУМА»$^{-}$
. . . и т. д.

В остальной части цепи течет переменный ток, перенося эти заряды.

При постоянном напряжении, вызывающем постоянный ток, сопротивление емкости равно бесконечности — ток не течет через изоляционную прокладку. При переменном же напряжении емкость ведет себя как обычное сопротивление [2] — чем больше емкость, тем меньше «сопротивление» или «импеданс». Именно в силу быстрых изменений переменного напряжения кажется, что через емкость проходит ток. При ускорении этих изменений — при переменном токе более высокой частоты — «сопротивление» меньше. (Заряд той же величины будет попадать на пластины за более короткое время, тем самым давая больший ток, и, следовательно, «сопротивление» меньше.) Итак, емкость может действовать как фильтр, с помощью которого можно отделять переменный ток от постоянного. Для переменного же тока смешанной частоты она может действовать как фильтр частот: позволять легко проходить переменному току высокой частоты и оказывать



Фиг. 84. Опыт 7 (б).

---

[1] В своей электромагнитной теории Максвелл предположил, что переменное колеблющееся электрическое поле в изоляторе конденсатора представляет собой одну из форм электрического тока. В этом смысле ток все время течет по цепи. Так как между пластинами конденсатора может быть вакуум, новая разновидность тока не есть просачивание зарядов через плохой изолятор, а представляет собой ток в пустоте. Но как определить, что такой ток там есть? По создаваемому им магнитному полю. Эта фантастическая идея позволила Максвеллу предсказать электромагнитные волны; но в простейших рассуждениях мы не будем ее использовать.

[2] Имеется существенное отличие: ток выделяет в сопротивлении тепло независимо от того, переменный он или постоянный. В емкости же переменное напряжение не приводит к выделению тепла — оно просто туда-сюда перегоняет заряды, запасая или расходуя энергию электрического поля. Кроме того, существует различие в «фазах». В обычном сопротивлении ток колеблется «в ногу» с приложенным переменным напряжением; в емкости же ток зарядки опережает его на четверть цикла, достигая своего максимального значения на четверть цикла раньше напряжения. Разность фаз связана с величиной тепловых потерь простым алгебраическим соотношением.

гораздо большее сопротивление переменному току низкой частоты. В этом смысле емкость противоположна «дроссельной» катушке, которая препятствует изменению тока в цепи и, следовательно, легко проводит постоянный ток, оказывая сопротивление переменному току низкой частоты и большое сопротивление току высокой частоты.

Далее будет видно, что в радиоцепях емкость нередко выступает в роли такого фильтра. Часто можно будет увидеть комбинацию конденсатора и дроссельной катушки, используемую в усилителях для сглаживания скачущего по величине постоянного тока в стабильный постоянный ток, или для «выпрямления» переменного тока в постоянный, или же для отделения переменного тока высокой частоты («радиочастоты») от переменного тока низкой частоты (звуковой частоты).

Опыт 8. *Триод.* Описание *общего принципа работы триода* приведено в гл. 33.

Стандартные радиолампы, играющие существенную роль в радиоприемниках, передатчиках, усилителях и т. д., являются триодами с подогревным катодом, сеткой и анодом. Другие лампы с причудливыми названиями и большим числом электродов (так называемые пентоды) фактически являются тоже триодами, но с дополнительными деталями. Основной принцип действия у них тот же самый.

Студенты, обучающиеся на радиоинженеров, проделывают длительные опыты с триодами, чтобы построить для них график АНОДНЫЙ ТОК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ НА СЕТКЕ, поскольку из этого графика можно получить интересную информацию, такую, как «сопротивление» лампы, коэффициент ее усиления, емкость и т. д. *В нашем курсе следует проделать более простой опыт: включить лампу и обнаружить ее усиление.* (Используйте простой триод, такой, как 6Ж5.)

Устройство лампы. Неотъемлемой частью лампы является нагревающий провод или нить накала (соединенная с клеммами *Н*, *Н*). Нить накала подогревает окружающий ее катод (соединенный с выводом *К*), который, будучи раскаленным, испускает электроны. Катод окружен спиральным проводом, сеткой (соединенной с выводом *G*), изолированной от катода. За ними расположен анод — экран из темного металла. К сожалению, практически только анод и можно увидеть сквозь стеклянный корпус лампы. Внутри лампы хороший вакуум. Попросите дать вам разбитую лампу и посмотрите на сетку и нить накала: все устройство—прямо ювелирная работа, чудо механической сборки.

Опыт 8 (а). *Включение лампы* (фиг. 85).

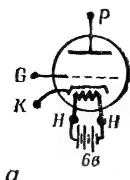
а) Смонтируйте цепь для разогрева нити накала, включив в нее выключатель, амперметр и батарею на 6 *в*, без реостата. Нити накала большинства ламп, рассчитаны на работу при 6,3 *в*, но ток от 6 *в* тоже сможет разогреть катод достаточно сильно, так, чтобы из него вылетало необходимое количество электронов.

б) Для того чтобы можно было управлять потоком электронов, между сеткой и катодом должна существовать определенная разность потенциалов. Если сетка заряжена положительно, она способствует лишь разрушительному действию ливня электронов, поэтому в электронике на сетку никогда не подается положительное напряжение. Чтобы иметь ощутимый контроль, потенциал сетки должен быть на несколько вольт ниже потенциала катода.

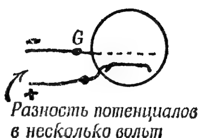
в) Для того чтобы иметь возможность создавать между сеткой

и катодом подходящую разность потенциалов, воспользуйтесь потенциометром и батареей (с э. д. с., скажем, 10 *в*).

Воспользуйтесь напряжением сети постоянного тока в 120 *в* и включите в цепь миллиамперметр. Включать вольтметр нет необходимости.



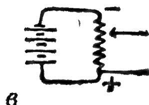
Фиг. 85. Подогрев катода.



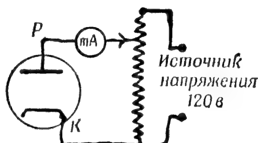
Фиг. 86. Смещение на сетке.

г) Чтобы на анод попали все электроны, которые летят на сетку, между анодом и катодом должна существовать достаточно большая разность потенциалов. Какого знака должно быть напряжение на аноде, «+» или «—»?

Нарисуйте вашу цепь, соберите ее и опробуйте для того, чтобы удостовериться в наличии анодного тока.



Фиг. 87. Делитель напряжения на сетке.



Фиг. 88. Анодная цепь.

После этого лампа готова к опытам 8(б) и 8(в).

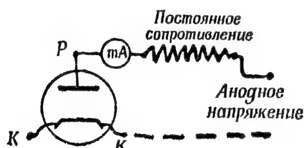
Усиление

Когда триод работает как усилитель, то напряжение, приложенное между его сеткой и катодом, он превращает в еще большее напряжение на сопротивлении, включенном в анодную цепь. Основной механизм усиления (описанный в гл. 33) таков: изменение сеточного напряжения влечет за собой сильное изменение потока электронов через сетку. Проходя через сетку, поток ускоряется полем, создаваемым большой разностью потенциалов между анодом и катодом, в направлении к аноду. Следовательно,

изменения сеточного напряжения приводят к большим изменениям «анодного тока» — тока электронов от катода через сетку к аноду, затем через анодную батарею (или что-либо эквивалентное ей) назад к катоду. Кроме того, этот анодный ток может проходить через любую аппаратуру, последовательно включенную в анодную сеть. Именно в ней могут проявляться усиленные изменения напряжения. В анодной цепи происходит не только усиление напряжения. В ней также происходит и усиление тока. Поэтому получаемая мощность на выходе анодной цепи превышает во много раз мощность на входе цепи сетки. В отличие от трансформатора лампа усиливает мощность, причем дополнительная энергия черпается от батареи в анодной цепи.

Опыт 8(б). *Триод-усилитель.* Сделайте следующие изменения в вашей цепи:

а) В анодную цепь включите реостат сопротивлений, чтобы можно было сделать разность потенциалов



Фиг. 89. Опыт 8 (б).

пропорциональной потоку электронов. Это «выходное напряжение». В многокаскадных усилителях оно может затем подаваться на сетки других ламп.

б) Параллельно переменному напряжению, приложенному между сеткой и катодом в опыте 8(а), включите вольтметр V_1. Он будет показывать изменения напряжения «на входе».

в) Параллельно сопротивлению в анодной цепи включите вольтметр V_2. Он будет показывать изменения напряжения «на выходе».

Начните двигать ручку 10-вольтового реостата на входе сетки вверх — вниз и следите за показаниями обоих вольтметров. Вы должны увидеть «усиление»: при *изменении* показания V_1 на 1 *в* наблюдается *изменение* показания V_2 на несколько вольт. Коэффициент усиления небольшого триода, такого, как 6Ж5, равен 5—10. У некоторых триодов он может достигать значения 10 или 20, или еще выше. Чтобы оценить коэффициент усиления, померьте и сравните между собой изменения напряжений на V_1 и V_2. Определите для вашей схемы область отличного от нуля анодного тока, устранив тем самым область «обрезания», в которой анодный ток падает до нуля. Запишите найденную для вашей схемы оценку «коэффициента усиления напряжения» лампы. Если вы хотите измерить «коэффициент усиления напряжения» в лампе более профессионально, попробуйте в качестве факультативной работы проделать опыт 8(г).

Опыт 8(в). *Усиление музыкальных звуков.* Воспользуйтесь той же самой цепью для усиления быстро меняющегося тока, который в громкоговорителе или телефоне вызывает музыкальный звук. Переменное напряжение, поданное на сетку, следует усилить, чтобы на переменном сопротивлении в анодной цепи возникало несколько большее напряжение. Низкое переменное напряжение с частотой в несколько сотен колебаний в секунду

можно получить, использовав колебательный контур. Когда благодаря этому напряжению через телефонную трубку течет переменный ток, то возникает напевный музыкальный звук, причем тон этого звука тем выше, чем выше частота колебаний. (Вместо колебательного контура, дающего звук одной ноты, можно было бы использовать выходное напряжение транслирующего музыку небольшого приемника или проигрывателя.)

Разомкните цепь между сеткой и катодом и присоедините концы колебательного контура к выводным проводам. Смещение на сетке, создаваемое батареей или потенциометром, оставьте [1]. Хотя в нем нет особой нужды, но так у вас будет уверенность, что сетка останется заряженной отрицательно. Попробуйте менять смещение на сетке. После этого послушайте и посмотрите усиление лампы следующим образом:

а) *Опыт с телефонной трубкой.* Соедините телефонную трубку выводными концами с колебательным контуром и послушайте, как звучит «вход». Затем провода от телефонной трубки подсоедините параллельно сопротивлению в анодной цепи и послушайте, как звучит «выход». (Телефонная трубка должна обладать высоким сопротивлением, иначе ее подсоединение будет сильно менять параметры цепи.)

б) *Опыт с электронно-лучевым осциллографом.* Соедините выводные концы колебательного контура с пластинами вертикальной развертки осциллографа и подстройте вертикальную развертку так, чтобы амплитуда вертикальных колебаний луча составляла около 1 *см*. Затем включите горизонтальную развертку (она заставляет электронный луч двигаться взад и вперед по горизонтали), чтобы иметь возможность наблюдать колебания напряжения во времени [2]. Затем к клеммам вертикальной развертки подсоедините концы сопротивления на выходе и посмотрите, как меняется во времени выходное напряжение. Оцените коэффициент усиления напряжения, сравнив в обоих случаях *максимальные отклонения* луча. Запишите полученное значение и сравните его с оценкой, найденной вами ранее по показаниям вольтметра.

Опыт 8(г). (Для факультативной работы.) *Коэффициент усиления. Другой вариант опыта* 8(б). Здесь излагается способ более профессиональной оценки коэффициента усиления. К источнику анодного напряжения подсоедините потенциометр, а вольтметр отключите от анодного сопротивления и включите его так, как показано на фиг. 90. Затем попробуйте изменить величину анодного тока на одно и то же значение сначала путем изменения напряжения на сетке, а затем анодного напряжения. Это покажет, насколько меняется напряжение в анодной цепи при эквивалентном измене-

---

[1] Если одним и тем же колебательным контуром и источником напряжения пользуются несколько групп студентов, существует опасность короткого замыкания источника напряжения при перепутывании входа и выхода. В целях безопасности напряжение на колебательный контур следует подавать от маленького трансформатора, причем каждой группе от своего.

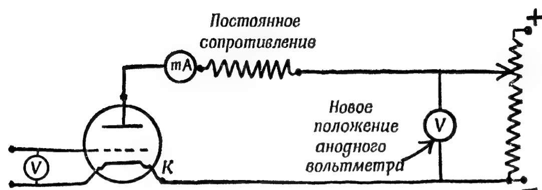
[2] Специальная ручка, обозначенная «синхронизация», предназначена для установления стабильной картины, для того чтобы заставить луч описывать каждый раз одну и ту же траекторию. Ручку лучше самим не трогать, а в случае необходимости отрегулировать изображение лучше обратиться за помощью. Принцип действия сигнала «синхронизации» будет объяснен позже.

нии напряжения в цепи сетки. Далее сделайте следующее:

а) Найдите ту область изменения напряжения на сетке, которая отвечает плавному изменению тока в анодной цепи, тем самым выкинув из рассмотрения область «обрезания», в которой анодный ток падает до нуля. Затем понемногу меняйте напряжение на сетке в определенном интервале, скажем от —3 до —1 *в*. Наблюдайте за изменением анодного тока. (*Запишите* абсолютные показания прибора, а не разности.)

б) Затем при одном или двух использованных значениях напряжения на сетке сделайте так, чтобы ток в анодной цепи менялся на точно такую же величину при изменении анодного напряжения. (По-прежнему записывая показания прибора.) Затем вычислите коэффициент усиления, подобно тому как это сделано в приведенном ниже примере.

Пример. Предположим, что при изменении напряжения на сетке от —3 до —1 *в* ток в анодной цепи возрастает от 3 до 7 *ма*. Допустим, что при постоянном напряжении на сетке —1 *в* ток в анодной цепи можно уменьшить с 7 до 3 *ма* путем изменения напряжения в анодной цепи со 120 до 80 *в*. Тогда одно и то же изменение тока (в данном примере) происходит при изменении анодного напряжения на 40 *в*, а напряжения на сетке — на 2 *в*: необходимо 40 *в* вместо всего лишь 2 *в*. Следовательно, сетка в 20 раз более эффективно изменяет величину анодного тока, чем анодное напряжение. Отсюда вывод таков: коэффициент усиления равен $^{40}/_{2}$, т. е. 20.

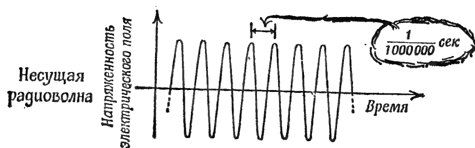


Фиг. 90. Опыт 8 (г).

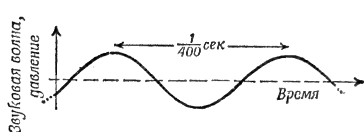
Необходимость выпрямления в радиотехнике

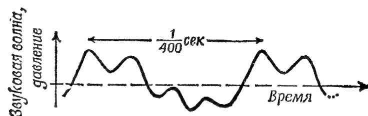
Хотя мы не будем изучать радиотехнику детально, вы уже должны быть готовы к пониманию принципов действия основных частей радиоприемника. Однако сделаем следующие необходимые пояснения.

Частоты звуков речи и музыки заключены в интервале от нескольких десятков до нескольких тысяч колебаний в секунду. Существуют два возражения против использования радиоволн в таком диапазоне частот: 1) для достаточно мощной радиостанции, работающей на столь низких частотах, необходима грандиозная система антенн; 2) владельцы радиоприемников будут слышать одновременно все соседние станции, т. е. сплошную какофонию звуков.

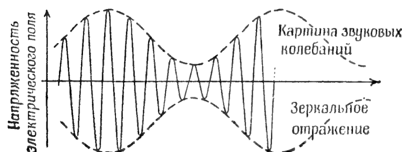


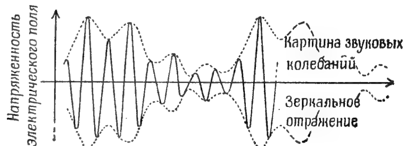
Фиг. 91. Временна́я развертка радиоволны.
Частота волны 1 000 000 колебаний в 1 *сек*, амплитуда постоянна.



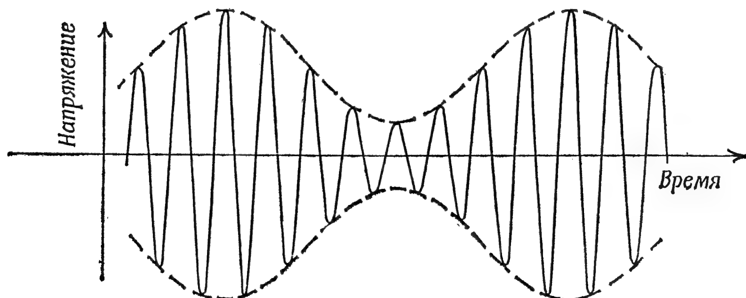


Фиг. 92. Временна́я развертка звуковой волны с частотой в несколько сотен колебаний в 1 сек.
Слева — одна музыкальная нота: синусоида, повторяющаяся с частотой, скажем, 400 раз в 1 *сек*; справа — гласный звук или нота, взятая на музыкальном инструменте. Форма волны сложнее, повторения происходят с частотой, скажем, 400 раз в 1 *сек*.





Фиг. 93. Радиоволна, «модулированная» звуковыми колебаниями.
Частота радиоволны равна миллиону или больше колебаний в 1 *сек*, следовательно, в одном периоде акустической волны укладываются тысячи радиочастотных колебаний. На приведенных рисунках истинные соотношения не выдержаны.

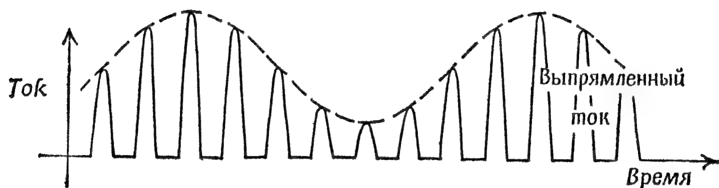


Фиг. 94.

Если большую мощность трудно излучать на частоте радиоволны 1000 колебаний в 1 *сек*, то это легко делать на частоте 1 000 000 колебаний в 1 *сек*. Поэтому радиостанции излучают радиоволны высоких частот (радиочастоты), *амплитуда* которых, однако, меняется в соответствии с колебаниями звуков речи или музыки (звуковые частоты).

Основная волна («несущая»), когда она не несет какую-либо мелодию, выглядит так, как показано на фиг. 91.

Картина звуковой волны, которую необходимо передать с помощью радиоволны, выглядит подобно изображенной на фиг. 92.



Фиг. 95.

Амплитуду основной радиоволны заставляют следовать форме звуковой волны: она «промодулирована», как на фиг. 93.

Радиоволны такого вида излучаются радиовещательной станцией. Когда такая волна достигает антенны радиоприемника, она наводит в ней колеблющееся с частотой волны напряжение. При этом между антенной и землей возникает слабый ток той же самой частоты. Если приемная система устроена так, что ее собственные колебания точно такой же частоты, то имеет место «резонанс» [1], и поступающая радиоволна вызывает колебания большой амплитуды. Владелец радиоприемника настраивает свою систему антенна — земля на частоту волны той радиостанции, которую он хочет слушать. Он делает это вращением ручки конденсатора колебательного контура, который в его приемнике включен в цепь, связывающую антенну с заземлением.

Принятые антенной модулированные радиочастотные колебания подаются на сетку триода и преобразуются в усиленные колебания тока в анодной цепи, причем увеличение мощности этих колебаний происходит за счет анодной батареи. Можно пред-

---

[1] Античное название — «ответные колебания» (симпатические колебания). Родитель, раскачивающий своего ребенка на качелях, совершая малые толчки с определенной частотой, в резонанс, может сильно раскачать его.

ставить себе, как в приемнике друг за другом следуют новые стадии усиления, после окончания которых ток направляется в громкоговоритель. Но это будет полнейшим заблуждением. Массивная катушка или диффузор громкоговорителя не способны следовать быстрым радиочастотным колебаниям. Даже если бы они и могли, то получился бы не звук, а всего лишь высокочастотный шум, меняющийся в такт звуковым колебаниям. Поэтому необходимо перевести радиочастотные колебания в нечто, что передавало бы картину звуковых колебаний. Это производится путем выпрямления радиочастотных колебаний (в радиотехнике это называется «детектированием»). На фиг. 94 (это перерисованная фиг. 93) изображена картина колебаний тока на входе радиоприемника и соответствующая ей картина колебаний напряжения на сетке радиолампы.

При выпрямлении тока или напряжения с помощью устройства, аналогичного диоду, действующему подобно одностороннему клапану, остается лишь только верхняя половина изображенной картины колебаний, а нижняя отсекается.

Если бы ток, передающий исходную картину колебаний, попадал в громкоговоритель, то он действовал бы на диффузор следующим образом, не приводя к сколько-нибудь заметному отклику с его стороны:

PUSH PULL PUSH PULL PUSH PULL PUSH PULL PUSH PULL PUSH PULL PUSH PULL PUSH PULL PUSH PULL PUSH PULL PUSH PULL PUSH PULL PUSH

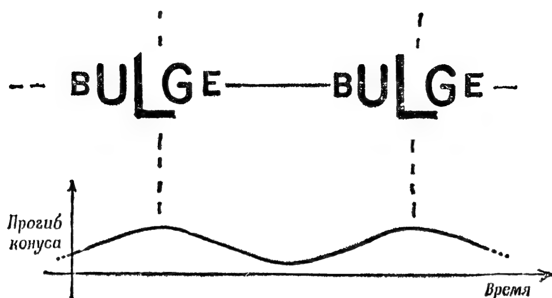
Фиг. 96.

Выпрямленный ток будет раскачивать колебания диффузора следующим образом:

PUSH PUSH -PUSH PUSH PUSH PUSH PUSH PUSH PUSH PUSH -PUSH PUSH PUSH

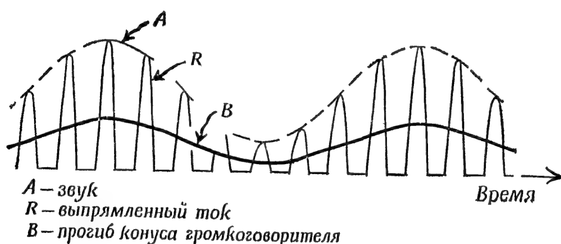
Фиг. 97.

Массивный диффузор суммировал бы эти толчки, происходящие с частотой миллион колебаний в секунду, и отвечал бы на их общее среднее подобно следующему:



Фиг. 98.

Такое сглаженное среднее выпрямленных радиочастотных колебаний заставляет диффузор громкоговорителя следовать несколько ослабленным звуковым колебаниям. Поэтому из громкоговорителя выходят звуковые волны, являющиеся хорошей копией первоначальных звуковых волн, служивших для модуляции радиочастотных волн.



Фиг. 99.

Такие медленные колебания звуковой частоты могут быть далее усилены другим триодом, действующим как «усилитель звуковой частоты».

Конечное напряжение звуковой частоты создается лампой, обязательно обладающей высоким сопротивлением, но сами

громкоговорители[1] имеют низкое сопротивление. Вместо «сопротивление» скорее следовало бы говорить «импеданс», имея в виду более общий характер сопротивления цепи «меняющемуся току»[2]. Для работы громкоговорителя нужны большие токи при слабых напряжениях в отличие от того, что получается от радиолампы — слабые токи и большие напряжения. Необходимо «уравнять» импедансы громкоговорителя и усилителя, что и делается с помощью понижающего трансформатора. При этом выигрыш в мощности отсутствует, но токи и напряжения получаются такими, какие необходимы для воспроизведения звука.

Выравнивание «импедансов»

Такое выравнивание импедансов необходимо в разных областях. Боксер-профессионал своим ударом (на ринге) щуплому пареньку наносит слабый ущерб — тот просто отлетает прочь. Если же он ударит слона, то сам отскочит назад. Когда же он наносит удар противнику равного с ним веса, то этот удар для последнего может быть по-настоящему сокрушительным. Почти точно так же для наилучшей передачи энергии или мощности от источника к потребителю необходимо, чтобы их импедансы были одинаковыми. Возьмем простой пример: батарея, которая снабжает электроэнергией электрическую плиту. Как устроить плиту, чтобы она брала от батареи максимум энергии? Ток в такой простой цепи (батарея+плита) выделяет в электроплите тепло. Однако батарея обладает собственным внутренним сопротивлением, и поэтому ток в ней также выделяет тепло, правда, абсолютно бесполезное. Попробуйте сделать плиту с очень высоким сопротивлением: ток в цепи будет мал и, следовательно, тепла в ней выделяться будет очень мало, причем в основном в плите. Попробуйте соорудить плиту с очень низким сопротивлением: тогда ток будет большим, тепла будет выделяться много, причем в основном в батарее. В том и другом предельных случаях плита получает мало тепла. Но при некотором промежуточном сопротивлении плита получит гораздо больше тепла. Расчетом и методом проб и ошибок можно показать, что электроплита будет получать наибольшее количество тепла в том случае, когда она обладает таким же сопротивлением, как и батарея. Тогда в той и в другой выделяется одинаковое количество тепла. *Потребитель получит максимальную энергию тогда, когда сопротивление потребляющих приборов (импеданс) одинаково с сопротивлением источника энергии*, при этом он получает 50% общего количества выработанной энергии. (Под это условие не подходит электростанция, снабжающая энергией лампочки в городе: в этом случае скорее желательно иметь *постоянное напряжение*, чем максимум переданной энергии. Поэтому

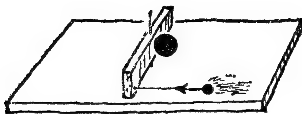
---

[1] Диффузор обычного громкоговорителя приводится в движение маленькой катушкой, находящейся в поле магнита — своего рода электрический мотор в возвратно поступательном варианте.

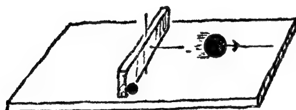
[2] Импеданс включает обычное омическое сопротивление и сопротивление, связанное с напряжениями, индуцированными магнитными полями *переменных* токов.

сопротивление лампочки гораздо выше сопротивления системы электроснабжения.)

При каскадной передаче энергии в радио или в моторе автомобиля от аккумулятора к стартеру желательно, чтобы передача была максимальной. Поэтому необходимо выравнивать импедансы. Это делается путем изготовления каскадов с равными импедансами или путем включения выравнивающего устройства.



Фиг. 100. Выравнивание импедансов.



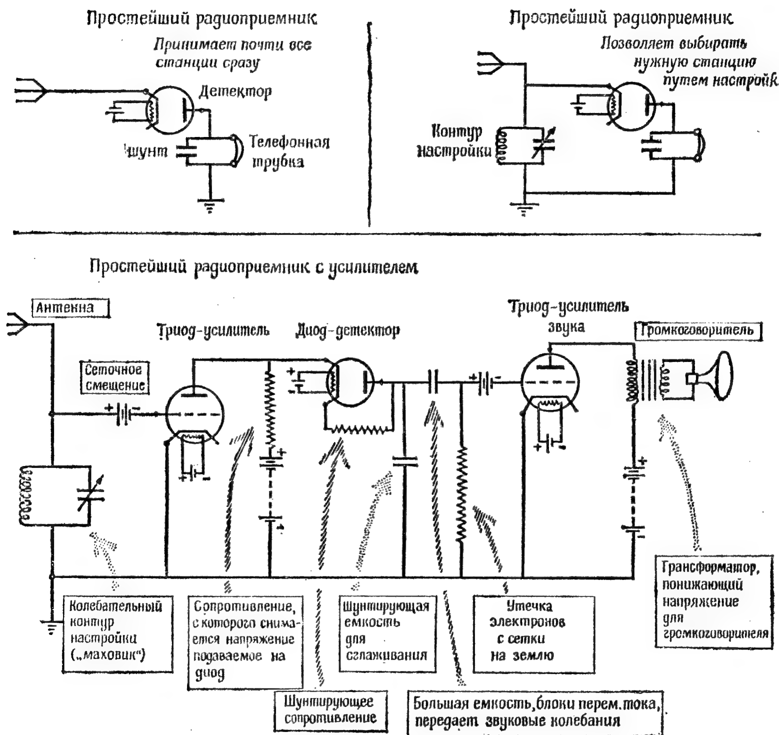
В том случае, когда равенства импедансов нет, можно его обеспечить, воспользовавшись определенным устройством. Допустим, необходимо передать энергию упругим соударением от движущегося шара к покоящемуся. Если массы шаров одинаковы, то передача энергии будет хорошей — при лобовом столкновении 100%, а в среднем 50% Если, однако, массы различны, энергия движущегося шара может практически не измениться. В этом случае для передачи максимально большой энергии необходимо воспользоваться устройством, таким, как рычаг (вроде детской доски-качалки, но с вертикальной осью).

Покоящийся шар (фиг. 100) кладется вплотную к доске-рычагу, по которой на некотором расстоянии от оси ударяет движущийся шар. Расстояния должны быть выбраны так, чтобы система шар+рычаг по массе эффективно была эквивалентна покоящемуся шару. То же самое в электроприборе осуществляет трансформатор: его подбирают таким образом, чтобы импеданс систем прибор+трансформатор был эффектно равен импедансу другого прибора.

Выравнивание импедансов происходит и в других областях. Боксер-профессионал, нанося удар щуплому пареньку, использует свой свободный локтевой сустав как рычаг. Конструкторы ядерных реакторов в качестве «замедлителей» нейтронов выбирают водород или углерод. Нейтрон или электрон, сталкиваясь с ядром золота, теряет лишь малую часть своей энергии. Только сталкиваясь с равной массой, они могут потерять значительную часть своей энергии. Длинный расширяющийся рупор уравнивает маленький громкоговоритель с *окружающим* воздухом. Хирург использует свой стетоскоп для того, чтобы уравнять импедансы уха и грудной клетки. Ухо человека содержит три маленькие косточки, которые служат для приведения в соответствие импедансов воздуха в ушной полости и жидкости во внутреннем ухе. Сердце человека находится в гармонии с системой артерий и вен до тех пор, пока они не обызвествляются с возрастом.

На самом деле электрические цепи в радиоприемнике гораздо сложнее, но их основные составные части, искусно смонтированные в сложные схемы в целях большей экономичности, чувствительности, избирательности и большего усиления,— это те, которые были описаны выше. Обычный радиоприемник должен выполнять следующие функции:

Прием: электромагнитное поле индуцирует токи в антенне.
Настройка: нужная радиостанция выбирается путем подстройки конденсаторов на резонанс.



Фиг. 101. Простейшие радиоприемники.

Нижний приемник в принципе должен работать, но практически едва ли мог бы работать. [Необходимо было бы устранить возможность возникновения собственных осцилляций в первом триоде. Анодную батарею следовало бы заменить питанием «от сети» (трансформатор +диод+сглаживающая дроссельная катушка+емкость). Катодный подогрев необходимо было бы осуществлять переменным током от трансформатора, а смещение на сетке создавать более сложным образом. Для получения избирательности в разумных пределах контур настройки нужно было бы заменить более сложным устройством.]

Выпрямление: радиочастотные колебания выпрямляются.
Усиление: амплитуда радиочастотных или акустических колебаний, или тех и других одновременно, усиливается по величине, причем *с возрастанием их мощности.*
Выравнивание: импеданс одного каскада усиления выравнивается со следующим.
Воспроизведение: динамик излучает звуковые волны.

На фиг. 101 изображено несколько радиосхем. Ни одна из них не могла бы нормально работать. Они намеренно упрощены, чтобы легче было продемонстрировать основной принцип их действия.

Опыт 9. *Измерение e/m и скорости электронов.* (Подробности зависят от находящейся в вашем распоряжении аппаратуры. Вам следует либо самим проделать эти опыты, либо посмотреть на их демонстрацию.)

Благодаря исключительно большой величине отношения e/m электроны были первыми обнаружены в качестве мельчайших осколков атомов. В тех же экспериментах было показано, что даже электроны, вылетевшие из электронной пушки с низким напряжением, движутся с громадными скоростями.

Проделайте эти важные измерения с потоком электронов из маленькой пушки. Для того чтобы найти для них e/m и их скорость, необходимо сделать два независимых опыта:

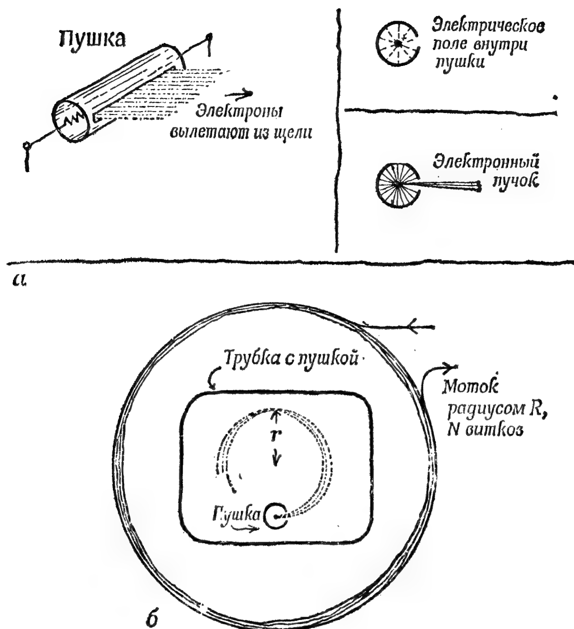
1) Исследовать действие электрического поля, создаваемого ускоряющим напряжением пушки.

2) Исследовать действие магнитного поля, закручивающего поток электронов по кругу.

Приборы и измерения

Узкий пучок электронов вылетает из простейшей электронной пушки, схематически изображенной на фиг. 102. Электроны, испарившиеся из раскаленной нити, ускоряются электрическим полем в направлении от нити к внешнему цилиндру. Поток этих электронов проходит через узкую щель в цилиндре. Все электроны вылетают с одинаковой кинетической энергией и движутся затем с постоянной скоростью. Измерьте ускоряющее напряжение пушки. Пучок электронов закручивается на круговую орбиту магнитным полем, создаваемым большой кольцевой катушкой. Измерьте радиус круговой орбиты. Для этого пучок необходимо сделать видимым.

Это можно осуществить, заставив пучок светиться. Его направляют или на плоский экран, покрытый каким-либо подходящим составом, или пропускают сквозь газ: пары ртути или водород при очень низком давлении. Диаметр орбиты измерьте с помощью линейки, держа ее поблизости. Проделайте необходимые измерения по определению величины напряженности магнитного поля, создаваемого катушкой.



Фиг. 102. Измерение v и e/m электрона.

Вычисления

1) *Из измерения ускоряющего напряжения в пушке*

а) Начните с алгебраических выкладок. Полагая, что электрон обладает зарядом *e кулон*, массой *m кг* и проходит в пушке разность потенциалов *Vв*, напишите уравнение, согласно которому энергия, приобретенная электроном в пушке, равна его кинетической энергии в выходящем пучке.

б) Подставьте в это уравнение величину ускоряющего напряжения и вычислите e/mv^2.

2) *На основании измерения размера орбиты в магнитном поле*

Вспомним, что заряд в *e кулон*, двигаясь со скоростью v поперек магнитного поля, в центре кольцевой катушки испытывает действие силы, равной

$$F = 10^{-7}(ev)\frac{(I_2 \cdot 2\pi R \cdot N)}{R^2},$$

где N — число витков в катушке радиусом R, I_2 — сила тока в катушке, выраженная в амперах.

$$F = 10^{-7}(ev)(H),$$

где H — напряженность магнитного поля, равная $(I_2 \cdot 2\pi N)/R$.

а) На основании ваших измерений вычислите величину H в ампервитках на метр.

б) Напишите уравнение, согласно которому сила 10^{-7} (ev) (H) равна реальной силе, закручивающей траекторию электронов в круг радиусом r (обратите внимание, что r — это радиус орбиты, а R — радиус катушки).

в) Подставьте найденную величину H и измеренное значение r в это уравнение и вычислите величину e/mv.

3) На основании этих двух результатов для e/mv^2 и e/mv вычислите v.

4) Вычислите e/m.

5) а) Выразите полученное вами e/m в виде числа, кратного e/M для ионов водорода, равного, согласно данным электролиза, $9{,}57 \cdot 10^7$ *кулон/кг.*

б) Вычислите отношение найденного вами значения к величине скорости света $3{,}0 \cdot 10^8$ *м/сек.*

Опыт 10. *Регулировка и использование электронно-лучевого осциллографа.*

Предостережение. Большая трубка осциллографа, как и все телевизионные трубки, дорога. *Поэтому не оставляйте пятно неподвижным на экране и не «прожгите» экран.*

Если в течение некоторого времени пятно, оставляемое электронным лучом, стоит на одном и том же месте, экран повреждается. Опасность здесь точно такая же, как в случае солнечного луча, сфокусированного линзой на клочке бумаги. Если же пятно движется по экрану, то опасность порчи экрана отсутствует. Не оставляйте пятно неподвижным на экране в течение времени, большего чем несколько секунд. Заставьте пятно бегать по экрану, или расфокусируйте его, или поверните ручку интенсивности до того положения, когда пятно совсем исчезнет.

Назначение ручки «Интенсивность». Не делайте пятно ярче, чем это необходимо. Слишком высокая яркость пятна повышает опасность порчи экрана, хотя ничем и не угрожает остальным частям трубки.

Опыт 10(а). *Ручки управления осциллографом.*

Экспериментирование. На передней панели осциллографа имеется несколько разных ручек управления, большинство которых соединено с расположенными внутри делителями напряжения. Покрутив эти ручки, попробуйте определить, чему каждая из них соответствует, и научитесь быстро устанавливать требуемое изображение. (При этом примите во внимание надписи рядом с ручками и замечания, приводимые ниже.)

Чертеж. Нарисуйте в вашей тетради переднюю панель осциллографа вместе с ручками управления и клеммами. Четко надпишите, какие функции выполняет каждая из них.

Проверочное испытание. Когда вы научитесь получать на экране осциллографа хорошее изображение картины переменного напряжения и сможете уверенно пользоваться ручками управления, попросите дать вам несложное задание. Вам могут предложить быстро установить какое-нибудь простое изображение на экране осциллографа, ручки которого повернуты самым произвольным образом: изображение при этом может либо отсутствовать вообще, либо меняться самым замысловатым образом.

Вероятно, можно было бы это делать путем кручения наугад ручек управления, но вряд ли такой путь привел бы к успеху. Продумайте логический подход к решению задачи.

Замечания об осциллографах

а) *Отклоняющие пластины.* В лучевой трубке имеется две пары «отклоняющих пластин», предназначенных для отклонения луча с помощью электрического поля. Каждая пара соединена с соответствующей парой клемм на корпусе осциллографа — для вертикального и горизонтального отклонений. Одна из клемм каждой пары соединена с металлическим корпусом и служит для заземления. Это соединение у обеих пар пластин является общим. В большинстве осциллографов клеммы соединены с отклоняющими пластинами не прямо, а через усилитель, расположенный внутри корпуса. В усилитель подается слабое напряжение с клемм, оно усиливается, после чего подается на отклоняющие пластины.

Усилитель обычно рассчитан на работу с переменным напряжением. Поэтому это устройство не годится для постоянного напряжения, скажем, от батареи. Такое напряжение должно подаваться прямо на пластины.

б) *Клеммы «контрольного сигнала».* Для контроля и регулировки подается слабое переменное напряжение. Оно снимается с расположенного внутри трансформатора и подается на клеммы, помеченные «Контроль» и «Земля». Этот контрольный сигнал можно подать на отклоняющие пластины с помощью одного провода, соединив «Контроль» с одной из вертикальных (или горизонтальных) пластин, поскольку другое соединение существует само собой: клемма «Земля» является общей как для контрольного напряжения системы пластин вертикального и горизонтального отклонений, так и для всего металлического корпуса прибора. Используйте этот контрольный сигнал (около 6 *в*) для создания переменного отклонения и исследуйте форму его волны.

в) *Синхронизирующий сигнал.* Движение луча по экрану регулярно повторяется, но, несмотря на это, изображение было бы нечетким, если бы луч не начинал движение всегда с одной и той же начальной точки изображения. Следовательно, желательно сделать так, чтобы луч возвращался назад каждый раз точно на одной и той же стадии изображения. Это делается с помощью одного остроумного внутреннего устройства. Луч движется по экрану нарастающим во времени электрическим полем, обусловленным возрастающим во времени напряжением, вырабатываемым в особом устройстве внутри корпуса. Пока это напряжение возрастает до некоторой большой величины, пятно проносится через весь экран, затем его необходимо вернуть назад. Это возвращение производится с помощью особой лампы, наполненной ионизующимся газом, выключающей напряжение, несущее по экрану луч, по достижении некоторой вполне определенной большой величины. На лампу подается это растущее во времени напряжение, и, когда напряжение достигает некоторой критической величины, в газе лампы вспыхивает разряд, в результате чего происходит «закорачивание» напряжения, движущего луч по экрану. При этом напряжение снимается, луч возвращается в исходную точку, после чего начинается новый цикл его движения. Как сделать так, чтобы наверняка это возвращение каждый раз происходило на одной и той же стадии изображения? Это делается путем добавления к напряжению, движущему луч, некоторого «синхронизирующего сигнала» перед тем, как это напряжение подается на газонаполненную лампу-выключатель.

Синхронизирующий сигнал представляет собой малую копию реально анализируемого напряжения (напряжения, подаваемого на вертикально

отклоняющие пластины). Таким образом, на газовую лампу, ожидающую, когда растущее напряжение развертки достигнет своей критической величины, подается напряжение развертки плюс копия анализируемого напряжения. Последнее меняется вместе с изображением на экране, и, когда пятно на экране совершает скачок вверх, добавка синхронизирующего сигнала к развертывающему напряжению угрожает выключить развертку. Синхронизирующий сигнал выглядит как серия «соломинок», как положительных, так и отрицательных, добавляемых к напряжению развертки, и к концу развертки выброс наверх синхронизирующего сигнала будет той последней «соломинкой», которая выключает развертку и тем самым заставляет начаться новую развертку. Тогда развертка будет запускаться снова и снова одним и тем же выбросом вверх в изображении.

Синхронизирующий сигнал должен быть достаточно интенсивным, чтобы осуществить выключение. Однако если он слишком велик, то он может расстроить изображение. Поэтому следует использовать *ручку «синх.» лишь для того, чтобы получать неподвижное изображение*, но не больше.

Предусмотрена также возможность получать синхронизирующий сигнал от внешних приборов. Не пользуйтесь ими, а держите включенной ручку «ВНУТРЕННЯЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ».

г) *Загадочные изображения.* Нас окружает множество переменных электрических полей, в основном обусловленных полями переменного тока частоты 50 *гц* в сети освещения, причем наше тело играет роль как бы антенны. Если коснуться провода, соединенного с отклоняющими пластинами, можно получить причудливые изображения. Они обусловлены случайными полями, до некоторой степени отфильтрованными нашим телом, действующим подобно емкости. Эти изображения выглядят интересно. Однако их диагностическая ценность мала.

Опыт 10(б). *Волновая картина речи и музыки.* Для получения волновой картины вашего голоса на экране осциллографа воспользуйтесь микрофоном телефонной трубки. Когда звуковые волны из вашего рта падают на микрофон телефона, они заставляют прогибаться и выпрямляться тонкую металлическую пластинку-мембрану. Пластинка в какой-то степени следует за колебаниями вашего голоса. За этой пластинкой расположена коробочка с насыпанным в нее угольным порошком. Мембрана попеременно то давит на порошок, то ослабляет давление. Уголь проводит ток. Однако, если между частичками угля имеется слабый контакт, сопротивление будет велико. Таким образом, при колебаниях диафрагмы сопротивление порошка меняется.

Через угольный порошок проходит электрический ток от батареи, причем этот ток меняется вместе с изменениями сопротивления, обусловленными за движениями мембраны, а последняя в свою очередь следует за звуковыми волнами. Следовательно, колебания тока имитируют исходные звуковые волны, хотя и с заметными искажениями.

Такой переменный ток посылается в первичную обмотку повышающего трансформатора, слабые изменения тока в которой приводят к значительным изменениям напряжения во вторичной обмотке. Последнее напряжение можно использовать для создания тока через слуховую трубку телефона или направить в осциллограф.

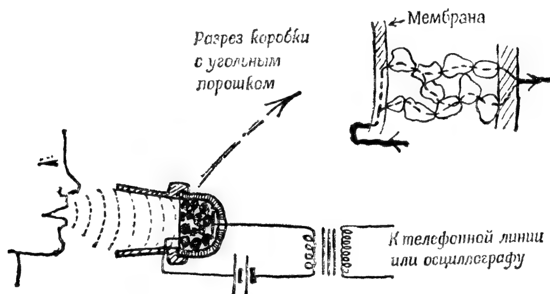
Соедините выход вашего трансформатора с отклоняющими пластинами осциллографа и пробуйте говорить и петь в микрофон телефона. Если тянуть какую-нибудь одну ноту, то можно отрегулиро-

вать развертку и ее синхронизирующий сигнал так, чтобы получить неподвижную картину, изображающую форму звуковой волны вашего голоса. Зарисуйте несколько таких изображений.

(Если вы говорите по-французски, попробуйте произнести сложное легкое «u», такое, как в «lu». На осциллографе будет видно, что этот звук содержит характерную высокочастотную компоненту. Затем произнесите звук шепотом. Эта компонента будет слышна, как свистящий музыкальный звук. Подобные упражнения могут помочь вам произносить трудные гласные.)

Если в вашем распоряжении имеются камертон, органные трубы и т. д., поэкспериментируйте также и с ними.

Попробуйте получить «биения», создаваемые двумя высокими звуками различной частоты. Для этой цели подойдут любые два камертона, две органные трубы или два студента, свистящие не в тон. Разность тонов, один из которых по высоте на две октавы выше первой октавы, а другой на один-два тона ниже первого, прекрасно демонстрирует эффект.



Фиг. 103. Микрофон с угольным порошком.
Звуковые волны заставляют угольный порошок вести себя как переменное сопротивление.

ОПЫТЫ НА БОЛЕЕ СОВРЕМЕННОМ УРОВНЕ

Другие опыты по изучению или демонстрации достижений физики нашего века сформулированы в доступном для вашей лабораторной работы виде. (Опыты в оригинальной постановке либо слишком дороги, либо слишком сложны, чтобы их можно было выполнить в ограниченный отрезок времени.) Некоторые из приводимых ниже опытов уже выполнимы, другие обещают быть таковыми:

11. *Опыт Милликена. Измерение заряда электрона.*
12. *Радиоактивный распад. Измерение времени полураспада* (см. гл. 39).
13. *Альфа-частицы. Пробег, опыты по рассеянию.*
14. *Свойства бета- и гамма-лучей.*
15. *Опыты с нейтронами.*
16. *Камеры Вильсона (расширяющиеся или диффузионные).*

17. *Изучение треков атомных частиц в фотоэмульсиях.*
18. *Самодельная радиолампа (с высоким вакуумом, полученным путем испарения металлической проволоки для связывания остаточного газа на стенках).*
19. *Фотоэлектрический эффект и квантовые постоянные. Измерение отношения h/e.*
20. *Измерение размеров молекулы по средней длине свободного пробега путем пропускания пучка атомов через газ с низким давлением.*
21. *Уровни энергии. Возбуждение атомов при бомбардировке электронами (опыт Франка и Герца).*
22. *Измерение скорости света в лабораторных условиях.*
23. *Релятивистский эффект изменения массы со скоростью. Отношение e/m для электронов различных энергий.*
24. *Масс-спектрограф.*
25. *Дифракция электронов.*
26. ... (?)

Предварительные задачи к главе 42

Задача 1. Простейшие формулы для циклотрона

[*Циклотрон — это устройство для получения ионов (заряженных атомов) высокой энергии путем повторяющихся ускорений, в каждом из которых ион проходит определенную разность потенциалов. Для того чтобы сообщать ионам ускоряющие импульсы многократно, прикладывается магнитное поле, чтобы ионы двигались по круговым орбитам. Вам требуется выяснить, как должны быть распределены* во времени *ускоряющие импульсы. Это кардинальная проблема устройства.*]

Предположим, что ион с массой m кг и зарядом Q движется со скоростью v м/сек поперек однородного магнитного поля напряженностью H а·виток/м. В магнитном поле на движущийся заряд действует сила. (Магнитное поле должно быть перпендикулярно направлению движения. Составляющая магнитного поля любой величины вдоль скорости заряда не вносит никакого вклада в эту силу.) При этом сила дается выражением $F=10^{-7}QvH$. (Когда магнитное поле — поле в центре кругового витка провода, оно равно $H=2\pi NI_2/R$ и его следует измерять в а·виток/м. В нашей задаче магнитное поле создается железным сердечником с двумя катушками, так что именно оно обозначено через H.)

(Замечание. В некоторых книгах вместо множителя 10^{-7} иногда стоит $1/c$, а также иногда фигурирует 4π. Это различие связано с использованием других единиц измерения e вместо кулонов.)

Сила перпендикулярна как полю, так и направлению скорости иона, поэтому она, не меняя величины скорости иона, изгибает траекторию его движения в окружность.

а) Напишите уравнение, согласно которому приведенная выше сила (выраженная через H) является центростремительной силой, заставляя ион двигаться по окружности радиусом r.

б) Решите уравнение, найденное в а) относительно скорости v, получив $v=\dots$.

в) Какое время необходимо для обращения некоторого объекта по окружности радиусом r со скоростью v?

г) Объедините результаты пунктов б) и в) и выразите время обращения по окружности через Q, H и т. д., исключив r из выражений.

д) Пусть электрический импульс ускоряет ион после каждой полуокружности его траектории. Как будет изменяться время между двумя последовательными импульсами, подаваемыми соответственно после прохождения ионом двух следующих друг за другом полуокружностей,— увеличиваться, уменьшаться или оставаться все время постоянным? Четко обоснуйте ваш ответ.

Задача 2. Циклотрон и относительность

В больших циклотронах ионы набирают громадную энергию за большое число оборотов по окружности, а так как энергия связана с ма сой, то масса иона слегка возрастает. Если ионы вращаются достаточно долгое время, то нужно ли на более поздней стадии ускорения уменьшить или увеличить длительность электрических импульсов?

ГЛАВА 42 • УСКОРИТЕЛИ — БОЛЬШИЕ МАШИНЫ

Физик... накапливает опытные данные, согласовывает и объединяет их вместе искусными экспериментами..., но самоуверенное утверждение, что это и есть природа, мы должны воспринимать ... с доброжелательной улыбкой и некоторой долей сомнения.

Гёте,
«Созерцание природы»

Мозг постоянно ищет новую информацию о периодичности и закономерностях происходящего вокруг нас. Этот процесс, который я называю сомнением, приводит к обнаружению существенно новых аналогий. Как только они найдены, мы, естественно, получаем основу для построения нашей системы законов. Затем считаем, что мир похож на наше построение, и продолжаем говорить о нем в наших терминах. Но рано или поздно появляется некто, сомневающийся, некто, пытающийся провести новые сравнения; если ему сопутствует успех, человечество научится лучше понимать мир, больше в нем видеть.

Дж. З. Юнг,
«Сомнение и уверенность в науке»

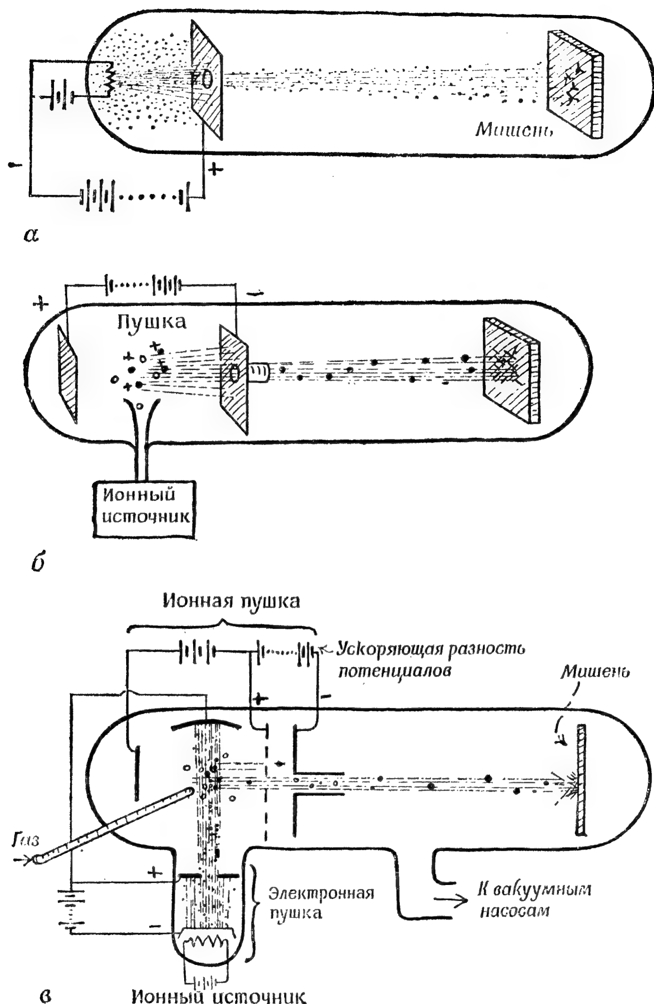
УСКОРИТЕЛИ — ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТОМОВ

Наш век — это век больших машин, которые на обыденном языке можно назвать «атомными таранами». Это ускорители атомов (или, более строго, ионные ускорители) и ускорители электронов. Ионизованные атомы и электроны, движущиеся с большими скоростями и обладающие огромными энергиями, являются исследовательским инструментом современной физики. Их используют для исследования других атомов, бомбардируя последние частицами высокой энергии. Изучая рассеяние быстрых частиц на покоящихся атомах, можно судить о внутренней структуре этих атомов или даже о структуре их ядер.

Иногда наши бомбардирующие «атомные снаряды» отскакивают от атомов мишени упруго; кинетическая энергия при этом сохраняется, и оба тела — снаряд и мишень — остаются неизменными. В некоторых случаях происходят неупругие столкновения,

атомы мишени «возбуждаются», так что затем они испускают γ-лучи и, возможно, даже после этого остаются нестабильными. А иногда происходят сильные ядерные изменения: налетающая частица попадает в мишень, но не выходит из нее; вместо «застрявшей» частицы из мишени могут вылететь какие-либо другие частицы — своего рода ядерный бильярд. В этом случае образуются новые атомы, чаще также нестабильные. Таким образом, стреляя по подходящим мишеням атомными снарядами из ускорителей, можно производить новые радиоактивные атомы, чтобы затем использовать их для атомных исследований или как «метки» обычных элементов в химических реакциях, в биологических процессах, в медицине, металлургии и т. д.

В природе имеются некоторые естественные атомные снаряды — излучения радиоактивных атомов. Это α-лучи, которые представляют собой ядра атомов гелия, выбрасываемые с энергией в несколько миллионов электронвольт, и β-лучи — электроны, испущенные со скоростями, достигающими 98% скорости света. Но нужно учитывать, что использование этих естественных средств весьма ограничено. Выбор энергии частиц ограничен, число «снарядов» в потоке зависит от количества полученного радиоактивного материала — обычно его мало. Вплоть до 1917 г. казалось, что выбор радиоактивных источников фиксирован: считалось, что атомы либо всегда стабильны и их нельзя расщепить, либо радиоактивны, но на процесс их распада невозможно повлиять. Действительно, ни термические, ни механические, ни химические воздействия не оказывали никакого влияния на характер радиоактивного распада. Но Резерфорду удалось добиться успеха, сделав нестабильными атомы обычного азота при помощи бомбардировки их α-частицами. «Жертва» поглотила пущенный в нее снаряд, испустила ядро водорода (*протон*), превратившись при этом в атом кислорода O^{17}. Это первое искусственное превращение одного элемента в другой вселило надежду, что мы сможем по своему желанию осуществить и другие ядерные превращения. В течение 12 лет такие надежды царили в атомной физике. Экспериментаторы охотились за необычными эффектами при подобного рода бомбардировках, но с переменным успехом. Теоретики мечтали о странных атомных частицах, которые были бы даже незаряженными — «нейтронами». Конструкторы, отказавшись от естественных пушек из радиоактивных ядер в пользу искусственных ускорителей, делали эскизы машин, способных ускорять пучки заряженных атомов до невероятных энергий. Обстрел других ядер — мишеней высокоэнергетическими протонами обещал вызвать важные превращения.



Фиг. 104. Ускорители: принципиальная схема.

а — электронный ускоритель является просто электронной пушкой, снабженной некоторыми приспособлениями для создания высокой ускоряющей разности потенциалов или ее эквивалента; *б* — ионный ускоритель (ускоритель Ван-де-Граафа, циклотрон, линейный ускоритель, беватрон и т. д.) является просто огромной ионной пушкой, ускоряющей пучок положительно заряженных ионов для бомбардировки ими мишени. Ионы являются атомами водорода, гелия... лишенными электронов, т. е. фактически ядрами этих атомов. Пушка снабжена некоторыми приспособлениями для создания высокой ускоряющей разности потенциалов или ее эквивалента; *в* — ионный ускоритель «в сборе» состоит из ионного источника, ионной пушки и мишени. Ионы образуются в результате облучения атомов газа электронами из электронной пушки. Для создания ионов в установку вводится тонкая струя разреженного газа; большие насосы обеспечивают высокий вакуум.

Поэтому идея ускорения пучка ионов водорода для использования их в качестве бомбардирующих снарядов выглядела крайне соблазнительной. Создание такого ускорителя, который мог бы «стрелять» атомными «снарядами» регулируемой энергии, действительно было весьма привлекательным, особенно если бы он создавал плотные потоки «снарядов» и разгонял их до более высоких энергий, чем энергии используемых уже альфа-частиц.

Вылетающие из радиоактивных атомов альфа-частицы, по-видимому, ускорялись в электрическом поле своих ядер-родителей. Если мы хотим создать свои собственные атомные «снаряды», мы должны снабдить их электрическим зарядом и затем, чтобы ускорить их, использовать в «пушке» электрическое поле. Мало надежд на то, что мы сможем непосредственно ускорять электрически нейтральные атомы, а еще меньше — не обладающие зарядом нейтроны, так как мы не можем тянуть или толкать их с большой силой. Гравитационному воздействию подвержена любая материя, заряженная или незаряженная, но величина гравитационного воздействия очень мала [1].

Необходимо использовать сравнительно более сильное воздействие *электрического* поля на заряженные атомы. Таким образом, проблемы состояли в следующем: создать в качестве снарядов заряженные атомы — что сравнительно легко — и получить огромную разность потенциалов, чтобы разогнать эти снаряды,— а это значительно труднее и дороже.

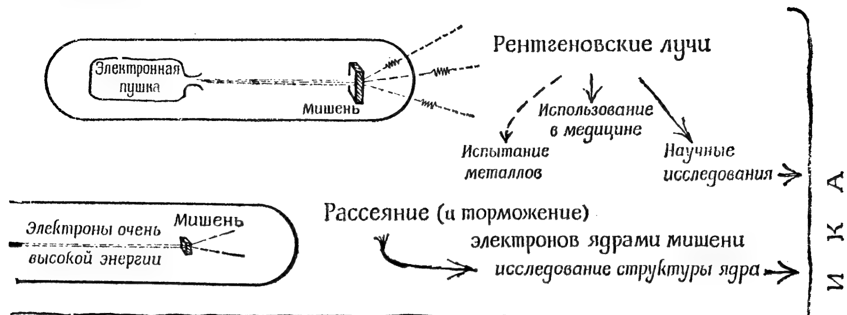
Ядерный словарь. Протоны и др.

Ядра водорода H^+ (или ${}_1H^1$) играют столь важную роль как в обсуждении структуры ядра, так и при использовании их в качестве бомбардирующих снарядов, что им дали специальное название, которым мы уже пользовались, а именно *протоны.*

Протон — это ядро атома водорода, лишенного своего единственного электрона. Когда мы говорим, что более тяжелые ядра состоят из протонов и нейтронов, мы объединяем оба сорта частиц общим названием *нуклоны.* (Существуют также специальные названия для более тяжелых изотопов водорода. Ядро «тяжелого водорода», или «дейтерия» ${}_1H^2$, часто называют *дейтроном;* радиоактивное ядро сверхтяжелого водорода, «трития» ${}_1H^3$, носит название *тритон*).

[1] Например, увеличение скорости атома водорода, свободно падающего в вакууме из состояния покоя, составляет примерно 180 *м/сек* на 1,6 *км* пути, т. е. прирост кинетической энергии атома меньше чем 1/1000 *эв*.

Электронные ускорители



Ионные ускорители (ускорители нуклонов, ядер: водород, гелий...)

Ионный источник и пушка

Мишень

Облучение

Некоторые атомы мишени превращаются в другие элементы

Некоторые из новых атомов радиоактивны

Радиоактивные элементы для биологических исследований, медицины....

Меченые атомы для исследований в области биологии, химии, физики, медицины.....

A

Рассеяние ядрами мишени и другие эффекты столкновений

Ионы очень высокой энергии

Расщепление или рождение новых частиц (мезоны, антипротоны и т.д.)

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

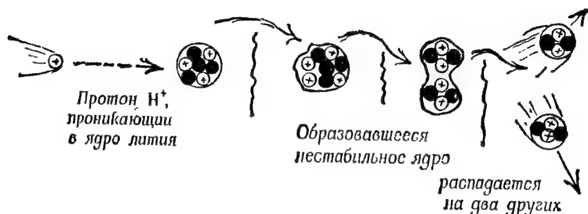
Фиг. 105. Применения ускорителей.

«Большие машины» сами по себе не являются объектами экспериментальных исследований. Они только снабжают экспериментаторов «инструментами» для изучения атомных ядер. Этими инструментами являются высокоскоростные заряженные частицы (электроны или ионы). Ускорители создают пучки таких частиц высокой энергии для бомбардировки ими мишеней. На рисунке изображены некоторые из возникающих при этом эффектов.

Ускорители

В начале 1930-х годов с открытием нейтрона, оказавшегося полезным для разведывательных набегов на атомные ядра, были построены первые большие машины, которые начали выдавать плотные потоки снарядов для исследования.

В Принстоне Ван-де-Грааф изобрел высоковольтный генератор непрерывного действия, в котором заряды переносятся шелковой лентой-конвейером на большой металлический шар — по существу это процесс непрерывной электризации посредством индукции. Пара таких машин давала разность потенциалов между их шарами-



Фиг. 106. Расщепление ядра атома лития.

накопителями, равную 500 000 *в*. Эту установку, равноценную гигантской батарее, можно было использовать для ускорения протонов и других ионов до энергии 500 000 *эв*, или 0,5 *Мэв*. Современные огромные машины Ван-де-Граафа, занимающие целые здания, могут вырабатывать разность потенциалов в несколько миллионов вольт и пропускать очень большие ионные токи. Были надежды получить еще более высокое напряжение, но стоимость установки и изоляторов в таком случае резко возросла бы. Поэтому вместо того, чтобы непосредственно создавать огромные напряжения, экспериментаторы попытались сложить действие многих сравнительно малых напряжений. В Калифорнии был построен первый большой циклотрон. В Кавендишской лаборатории в Кембридже молодые сотрудники Резерфорда создали установку, в которой многократно использовалось напряжение от выпрямителя переменного тока. Они складывали напряжение ступеньками, подобно лестнице. Специальные радиолампы искусно переключали заряжающее напряжение с одного конденсатора на следующий в высокой башне из конденсаторов, создавая таким образом большое напряжение на всей башне.

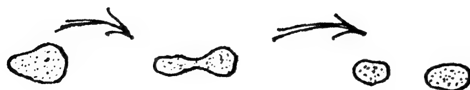
Резерфорд, как всегда, стремившийся испробовать новые средства для бомбардировки ядер, нетерпеливо относящийся ко всякого рода задержкам, однажды сказал: «Что ж, посмотрим, что наконец у вас получилось». Их ожидал большой успех: оказалось, что протоны, разогнанные в их установке до энергии всего 150 000 *эв*, смогли проникнуть в ядра атома лития и вызвать их распад на два атома гелия. Это искусственное расщепление атомного ядра проходило в масштабах много раз больших, чем случайно обнаруженное ранее Резерфордом расщепление атомов азота (фиг. 106). Человечество смогло отныне заставить «делиться» маленькие ядра атома лития [1].

Циклотроны

В это же время строился *циклотрон*, ускоряющий пучки ионов до высоких энергий по совершенно другому принципу. Вместо того чтобы создавать источники напряжения на миллионы вольт и более, подключать их к большим ионным пушкам, преодолевать большие трудности с надежной изоляцией установки, нельзя ли *многократно* использовать значительно меньшее напряжение, скажем 30 000 *в*, доводя энергию ионов до очень большой величины, не используя нигде в установке соответствующую данной энергии огромную разность потенциалов? Образно говоря, для того чтобы бросить мяч с очень большой скоростью, нельзя ли вместо одного гигантского броска, сделанного великаном, добиться этой же цели, последовательно ударяя мяч достаточно большое число раз? Для мяча одно из таких решений состояло бы в том, чтобы привязать его веревкой к столбу, как это делается в детском теннисе, и ударять его каждый раз, когда он проходит полную окружность. Таков же основной принцип работы циклотрона. Нельзя, конечно, привязать ионизованный атом к столбу, но его можно заставить двигаться по круговой орбите, поместив ион в магнитное поле,

---

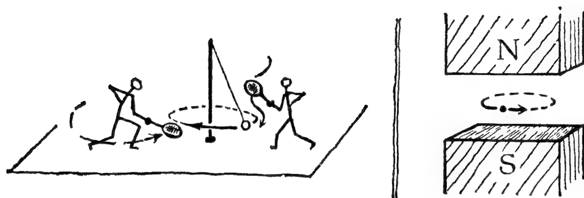
[1] «Деление» — термин, используемый биологами для обозначения процесса «разделения надвое». Некоторые простейшие организмы, например



Фиг. 107.

амёба, размножаются делением. Особь-родитель постепенно принимает продолговатую форму, посредине у нее образуется узкая перемычка, затем она делится на два новых организма.

перпендикулярное его траектории (фиг. 108). Если атом движется по такой окружности, его можно разгонять, периодически создавая в определенных участках траектории электрическое поле. Как уже говорилось, для того чтобы частица двигалась по кругу, к ней нужно приложить магнитное поле, перпендикулярное направлению ее движения. Поэтому циклотрон снабжен огромным магнитом, единственное назначение которого — удерживать движущиеся ионы на круговых орбитах, чтобы к ним можно было прилагать ускоряющие силы снова и снова, используя электрическое

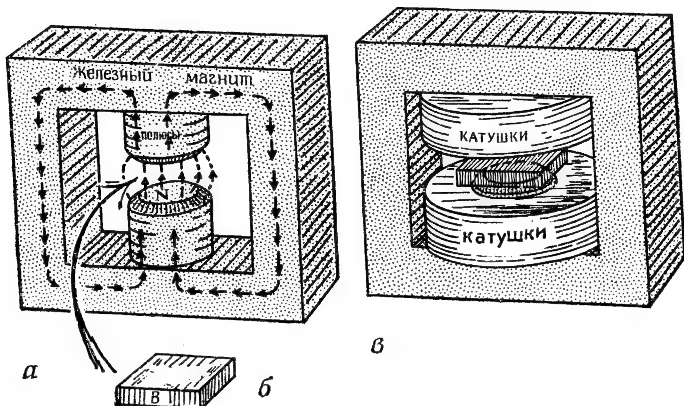


Фиг. 108. Магнит циклотрона.

поле. Мы не можем неоднократно ускорять ионы электрическим полем умеренной напряженности, просто создав его в области движения ионов, так как ионы будут одинаково часто двигаться как по направлению поля (ускоряясь на этих участках траектории), так и против поля (теряя энергию на этих участках), так что желаемого ускорения вовсе не произойдет. Для этой цели нужно использовать небольшую хитрость, выключая или включая электрическое поле в подходящие моменты времени; этим мы предотвратим ненужное торможение ионов на определенных участках траектории, заставив электрическое поле только ускорять ионы. Чтобы увидеть, как это делается практически, рассмотрим следующую упрощенную схему циклотрона.

Посредине зазора между магнитными полюсами находится откачанная до высокого вакуума большая коробка B, в которой ускоряются ионы. Это камера циклотрона. В ней находится источник протонов H^+, которые должны ускоряться. В камере расположены два ускоряющих электрода D и D'. Временно представим себе их в виде двух металлических пластин, расположенных друг против друга и подсоединенных к батарее, D — к положительному полюсу, а D' — к отрицательному. (На самом деле устройство в камере совсем другое, мы только временно рассмотрим эту модель, чтобы потом легче понять работу реаль-

ной установки.) Предположим, что напряжение батареи, к которой подключены электроды D и D', равно 20 000 *в*. Таким образом, в пространстве между заряженными электродами создается сильное однородное электрическое поле, а в других областях пространства (за пластинами) электрическое поле практически отсутствует. Будем считать, что положительно заряженный ион образовался где-то в центральной области между D и D'. Под действием электрического поля он начнет двигаться к D'. Представим себе, что непосредственно в месте попадания иона на электрод D' в пластине имеется маленькая дырка, через которую он вылетает наружу,

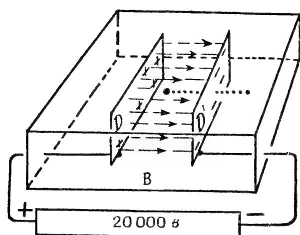


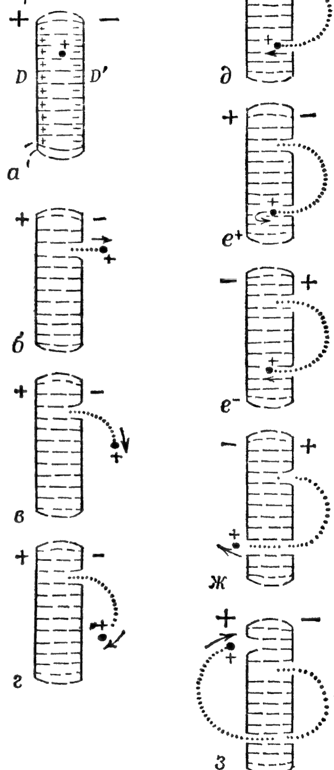
Фиг. 109.

а — магнит из мягкого железа намагничивается током, текущим по двум катушкам, так что в зазоре между полюсами магнита создается строго вертикальное и практически однородное магнитное поле; *б* — камера *В* — это прямоугольная коробка, в которую заключены ионный источник, дуанты для создания ускоряющих электрических полей и зонды для измерений в пучке ускоренных ионов. В камере поддерживается высокий вакуум; *в* — токи в катушках намагничивают железо и создают магнитное поле. Катушки, как правило, охлаждаются водой.

т. е. попадает в ту часть пространства, где электрическое поле пренебрежимо мало. Но магнитное поле перпендикулярно траектории иона, поэтому за электродом D' он будет двигаться по окружности. Описав полуокружность, ион снова подлетит к D', но уже с противоположной стороны. Представим, что и в этом месте сделана небольшая дырка. Влетев через эту дырку в пластине D', ион снова попадает в электрическое поле, но теперь уже он движется *против* поля и поэтому *замедляется*. При этом скорость иона уменьшится ровно на столько, на сколько она возросла при

его ускорении. Чтобы увеличить энергию иона и на этом этапе его движения, необходимо изменить направление электрического поля на противоположное. Другими словами, пока ион пролетает полуокружность за D', нужно отключить батарею и затем присоединить ее к электродам D и D' противоположным способом.





Фиг. 110. Движение ионов в упрощенном циклотроне. Ионы предварительно ускорены электрическим полем между пластинами D и D' внутри камеры.

а — ион ускоряется; *б* — ион вылетает через дырку в D', но так как он движется в магнитном поле, то начинает вращаться по круговой траектории; *в*, *г* — ион продолжает двигаться по круговой траектории, не меняя величины скорости (так как он вне электрического поля); *д* — ион через дырку снова влетает в электрическое поле, e^+ — если электрическое поле такое же, как и раньше, то ион замедляется, но e^- — если направление электрического поля изменится на противоположное, то ион будет снова ускоряться, *ж* — после первого ускорения, движения по полуокружности и второго ускорения ион снова вылетает через дырку в пластине D, но с возросшей скоростью, *з* — магнитное поле изгибает траекторию иона в полуокружность большего радиуса, так как ион движется быстрее, и т. д.

В этом случае, вернувшись в область $D - D'$, ион получит новый ускоряющий «шлепок». Далее, вылетев быстрее через дырку в пластине D, ион снова движется по полуокружности, но большего радиуса, чем раньше, так как после ускорения скорость его возросла. Когда он через дырку в D снова попадет в электрическое

поле, необходимо, чтобы направление поля было таким же, как в начале движения, т. е. за время движения иона за электродом D необходимо снова переключить полюсы батареи.

Теперь вы видите, какая получается история. Ион вращается по раскручивающейся спирали, состоящей из полуокружностей, двигаясь все быстрее и быстрее после каждого «шлепка» электрическим полем; но это электрическое поле должно менять направление на противоположное каждый раз за время движения иона по полуокружности. Если заряд иона равен заряду электрона, то 20 000-вольтная батарея сообщает ему энергию 20 000 *эв* каждый раз, когда ион пролетает ускоряющий промежуток $D - D'$. Если ион начал движение из состояния покоя недалеко от электрода D, то, достигнув электрода D', он приобретет энергию 20 000 *эв*; следующую порцию энергии в 20 000 *эв* он получит, описав полуокружность, еще 20 000 *эв* — после следующей полуокружности и т. д. Таким образом, после каждой полуокружности энергия иона увеличивается на 20 000 *эв*, или на 40 000 *эв* в течение каждого цикла ускорения. Описав 1000 полуокружностей, ион разгонится до энергии $1000 \times 20\,000$ *эв*, т. е. 20 *Мэв*. Такую же энергию ион приобрел бы от единственного «шлепка» батареи, создающей разность потенциалов 20 000 000 *в*. Изоляция и хранение такой батареи обошлись бы весьма дорого. Здесь же использовалась батарея напряжением только 20 000 *в*, изготовить которую сравнительно легко, а энергия и скорость ионов, предназначенных для бомбардировки других атомов, такие, как будто бы у нас была батарея на 20 000 000 *в*.

Это чудесно («теперь можно разбивать атомы»)! Но остались еще серьезные трудности. Каким образом быстро переключать батарею в нужные моменты времени? Как подобрать время переключения батареи при возрастании полуокружностей, по которым движется ион? Как предохранить ион от действия на него электрического поля (хотя и очень маленького) при его движении по полуокружностям *вне* ускоряющего промежутка $D - D'$? Как избежать бесполезной траты ионов, которые не попадают в дырки в электродах D и D', а застревают в металле? Это не второстепенные вопросы; чтобы установка заработала, на них должны быть найдены ответы. Сейчас мы покажем, как эти проблемы решаются в реальных ускорителях.

Нам необходимо изменять направление электрического поля на противоположное каждый раз, когда ион описывает полуокружность. Вместо батареи с быстродействующим переключателем используется источник переменного напряжения. В качестве такого источника применяется высокочастотный генератор, похожий

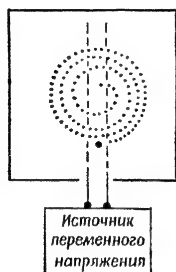
на те, что имеются на радиостанциях, который периодически меняет направление электрического поля в промежутке $D - D'$. Но теперь возникает второй вопрос и, кажется, более серьезный. Сможет ли ион вовремя пройти каждую следующую полуокружность?

Чтобы получить полный ускоряющий импульс, ион должен попасть в промежуток $D - D'$ в то время, когда разность потенциалов между D и D' максимальна. Если же он попадет туда немного раньше или немного позже, то ускорение будет меньшим. Если ион опоздает на четверть периода, то он вовсе не получит ускоряющего импульса, а при задержке на полпериода ион будет двигаться против электрического поля, т. е. будет тормозиться. Очевидно, нужно подобрать такую частоту генератора, чтобы максимум напряжения в промежутке $D - D'$ приходился на момент нахождения в нем иона, а за время движения иона по первой полуокружности поле успевало бы изменить свое направление и достичь максимального значения к моменту подлета иона к электроду. Но как быть с последующим движением иона, когда он начнет описывать все большие и большие полуокружности? Будет ли при этом ион успевать за периодическими изменениями электрического поля? Нужно ли менять частоту генератора таким образом, чтобы ионы каждый раз получали максимальный импульс, или можно заставить вращаться ионы по полуокружностям различных радиусов за одно и то же время? Вторая возможность была бы наилучшим решением проблемы, но можно ли ее осуществить? Другими словами, когда ион движется быстрее по большей полуокружности, будет ли путь достаточно длинным, чтобы пройти его за *прежнее* время? Для исследования этой задачи нужно было бы проделать «циклотронную алгебру» задачи 1. Проведите расчет, если вы этого еще не сделали, и вы обнаружите, что если магнитное поле постоянно во всей области движения иона, то и время движения иона по полуокружностям любого радиуса постоянно!

В этом основная причина простоты работы циклотрона. Генератор создает переменное напряжение фиксированной частоты, соответствующей величине магнитного поля и отношению e/M для иона (e — заряд, M — масса иона), которое в регулярные интервалы времени сообщает пучку ионов ускоряющие импульсы; ионы движутся по все увеличивающейся спирали, состоящей из полуокружностей нарастающих радиусов.

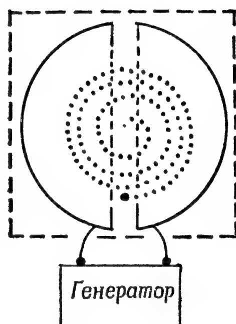
Вернемся теперь к другим вопросам. Как предохранить ионы от действия электрического поля при их движении по полуокруж-

ностям за промежутком $D - D'$ и как избежать бесполезной траты ионов при их столкновениях с электродами D и D'? Обе проблемы решаются одновременно, если заменить пластинки D и D' полыми коробками определенной формы. Известно, что внутри закрытой металлической коробки электрическое поле равно нулю; электрические заряды, подводимые к ней, располагаются на внешней поверхности металла, вследствие чего обращается в нуль электрическое поле как в стенках коробки, так и в пространстве внутри нее. В *почти закрытой* коробке электрическое поле практически везде равно нулю, за исключением областей пространства, непосредственно прилегающих к отверстию. Поэтому



Фиг. 111. Усовершенствование упрощенного циклотрона.

Заменим пластины D и D' решетками, так чтобы ион мог свободно пролетать через отверстия и двигаться по спирали, состоящей из полуокружностей. Вместо того чтобы переключать туда-сюда клеммы батареи, подсоединим D и D' к генератору, так что в промежутке $D-D'$ создается переменное электрическое поле. Это поле должно достигать максимального значения «+» или «—» через одинаковые промежутки времени, причем тогда, когда в эту область влетают ионы.

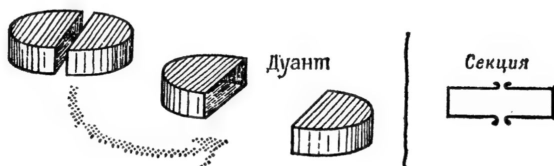


Фиг. 112. Усовершенствование упрощенного циклотрона до практически действующего устройства.

Вместо решеток D и D' поставим друг против друга пару дуантов (дуант — полая полукруглая коробка с открытым торцом) так, чтобы их торцы занимали место пластин D и D'. В пространстве между дуантами создается переменное электрическое поле. Полые дуанты экранируют ионы при их движении по полуокружностям от влияния случайных электрических полей.

простые пластины D и D' мы заменим плоскими, почти закрытыми медными коробками, расположенными так, чтобы между их открытыми частями остался тот же узкий промежуток $D - D'$. Размеры коробок выбираются так, чтобы в них помещалась самая большая полуокружность траектории иона. Чтобы наглядно представить себе вид этих коробок, предположим, что мы разрезали в верти-

кальной плоскости на две равные половинки консервную банку. В результате получились две коробки, имеющие форму ᗡ и D; вследствие такой формы их и называют «дуантами». Там, где в рассмотренной нами раньше грубой схеме располагались металлические пластины с отверстиями, в реальной машине находятся открытые плоскости дуантов. Таким образом, теперь ионы не теряются при столкновениях с электродами, так как они влетают в открытые щели дуантов; кроме того, ионы экранированы от влияния случайных электрических полей, так как их траектории почти полностью лежат в пространстве, ограниченном медными стенками дуантов.

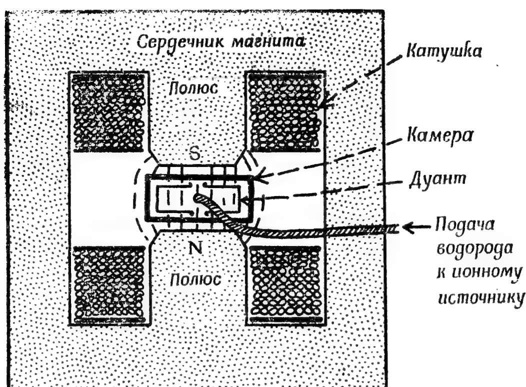


Фиг. 113.

Теперь мы должны рассмотреть другие проблемы: как создать ионы в пространстве между дуантами, как избежать нежелательных столкновений ионов с молекулами газа и, наконец, как «вывести» пучок ионов из циклотрона, т. е. как направить пучок ускоренных ионов на экспериментальные мишени — ведь именно с этой целью они и ускорялись? Ионы образуются при облучении газообразного водорода электронами из небольшой электронной пушки, расположенной вблизи центра камеры. Для этой цели внутрь камеры вводится тонкая струя водорода под низким давлением; большие насосы откачивают излишки водорода и случайно попавшие внутрь молекулы воздуха, поддерживая в камере максимально возможный вакуум.

Таким образом, полностью процесс ускорения ионов в циклотроне протекает следующим образом: в центре камеры циклотрона атомы водорода ионизуются потоком электронов; электрическое поле в промежутке $D - D'$ сообщает образовавшимся ионам небольшую энергию; описав полуокружность внутри дуанта, ионы возвращаются в ускоряющий промежуток между дуантами как раз в тот момент, когда поле изменило направление и достигло максимальной величины, снова ускоряются, описывают полуокружность большего радиуса во втором дуанте, снова

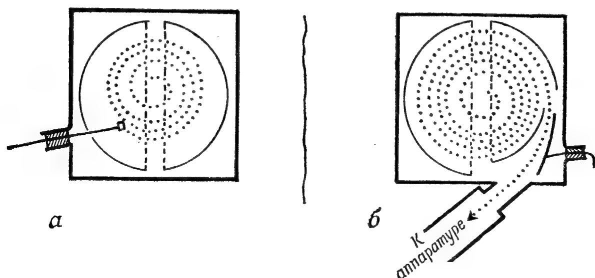
ускоряются в промежутке $D - D'$ (электрическое поле успело снова изменить свое направление), описывают еще большую полуокружность в первом дуанте (скорость ионов возросла) и т. д.



Фиг. 114. Вертикальное сечение циклотрона.

Ионный источник в центре камеры состоит из электронной пушки, облучающей молекулы водорода (вводимые внутрь тонким потоком через трубку), которые сперва распадаются на атомы, а потом ионизуются, образуя ионы H^+. Процесс ионизации происходит так быстро, что ионный источник похож на горящую электрическую дугу.

до тех пор, пока радиус самой большой полуокружности не сравняется с размерами дуантов. На самой дальней от центра орбите энергия ионов достигает огромного значения; в принципе экспе-



Фиг. 115. Использование циклотронного пучка.

а — «зонд» вводится так, что его конец захватывает пучок ионов внутри дуанта, на наибольшей полуокружности (т. е. когда ионы обладают максимальной энергией); *б* — «отклоняющая пластина», обладающая большим отрицательным потенциалом, изгибает траекторию ионов так, что они через окно в кожухе вылетают из циклотрона и по длинной пустой трубе подводятся к экспериментальной аппаратуре.

риментальные образцы для облучения ионами могут быть внесены прямо внутрь камеры. Однако, для того чтобы вводить и выводить мишени из камеры, необходимо соорудить вакуумный шлюз (подобно люку в подводных лодках для выхода из лодки под водой). Кроме того, для многих экспериментов удобнее вывести пучок ионов с наибольшей полуокружности (т. е. обладающих наибольшей энергией) наружу через окошечко из тонкого листа металла в стенке кожуха. Пучок выводится при помощи «отклоняющей пластины», на которую подается соответствующее электрическое напряжение. Затем этими ионами высокой энергии, обычно протонами, можно бомбардировать по нашему выбору любую мишень, наблюдая при этом изумляющее разнообразие ядерных превращений.

Циклотроны для более высоких энергий

Описанный выше простой циклотрон может ускорять ионы до энергий в несколько миллионов электронвольт. Если построить более крупный циклотрон, ожидая получить более высокие энергии, то окажется, что ионы с энергией несколько *Мэв* не успевают вовремя подлетать к ускоряющему промежутку. На внешних полуокружностях, где ионы должны были бы приобретать большую энергию, они вращаются все медленнее и медленнее. Другими словами, наша «циклотронная алгебра» в этом случае ввела нас в заблуждение. Почему же это произошло? Ведь если заряд иона не изменился и не изменилась величина магнитного поля (предполагается, что мы умеем строить электромагниты достаточно больших размеров), то, согласно классической ньютоновской механике, и время оборота иона по любой полуокружности не должно меняться при изменении ее радиуса. Причину этого явления объясняет специальная теория относительности. Согласно теории относительности, масса быстро движущегося иона увеличилась, так как кинетическая энергия сама по себе эквивалентна некоторой массе, которая складывается с массой покоя иона. Вследствие этого релятивистского увеличения массы ион не успевает за изменениями электрического поля. Можно исправить положение, модифицировав высокочастотный генератор. Сгусток ионов от ионного источника на ранних стадиях их движения ускоряется периодически, как это было описано раньше. Затем генератор медленно уменьшает частоту электрического поля, создавая все реже и реже ускоряющие импульсы в промежутке между дуантами, как раз тогда, когда туда подлетают потяжелевшие высокоэнер-

гетические ионы. После многократного ускорения из маленького циклотрона, диаметр магнита которого составляет всего около 1 *м*, выводятся ионы огромной энергии — около 20 *Мэв*. Затем увеличивают частоту генератора до нормальной, чтобы таким же способом ускорить новую группу ионов. Изменение частоты генератора осуществляется изменением емкости в колебательном контуре. Меняя частоту генератора в широких пределах, можно добиться ускорения частиц в циклотроне до энергий в несколько сотен *Мэв*. Правда, в этом случае понадобятся огромные магниты, весом в тысячи тонн.

Специальная теория относительности

Согласно теории относительности, при увеличении кинетической энергии частицы скорость частицы хотя и увеличивается, но всегда остается меньше скорости света c, в то время как неограниченно увеличивается наблюдаемая масса частицы. Именно этот эффект и имеет место в больших ускорителях. Это повышает стоимость и требует изменения устройства машины. При высоких скоростях масса протона *возрастает*; из-за этого мы вынуждены тратить средства на создание схем, «модулирующих частоту» генератора циклотрона. В больших кольцевых ускорителях ионы приобретают наибольшую энергию на поздних стадиях «ускорения», когда они описывают полуокружности почти за одно и то же время, так как их скорость очень близка к c и почти не меняется при дальнейшем ускорении; это обстоятельство должно быть учтено при модуляции частоты генератора [1]. Релятивистское увеличение массы выведенных из циклотрона протонов должно проявляться при их столкновениях с мишенями.

Наличие предельной скорости в релятивистской механике даже упрощает конструкцию *электронных* ускорителей: уже на первых этапах ускорения скорость электронов так близка к c, что последующее движение электронов происходит по круговым орбитам постоянного радиуса и за *одно и то же* время $T = 2\pi R/c$. Правда, с каждым оборотом электрона увеличивается его кинетическая энергия и, следовательно, масса; поэтому, чтобы удержать его

[1] Например, при увеличении кинетической энергии протона от 1 *Бэв* до 2, 3, 4 *Бэв* его скорость соответственно возрастает от 0,87 c до 0,94, 0,97, 0,98 c. Другими словами, при энергии 4 *Бэв* скорость протона составляет 98% скорости света, а не 2,8 c, как это получается из нерелятивистской формулы:

$$\text{Кинетическая энергия} = \frac{1}{2} mv^2.$$

на данной орбите, по определенному закону должно возрастать и *магнитное* поле. Таким образом, релятивистская механика и опыт полностью согласуются.

Необходимость еще больших энергий

Частицы еще больших энергий являются очень ценным инструментом исследования ядер. При столкновениях с ядрами они могли бы вызвать новые ядерные превращения. Физики заинтересовались, можно ли при помощи частиц достаточной энергии получить новые виды материи (т. е. новые виды элементарных частиц). Известно, что фотон энергии 1 *Мэв* и больше может «родить» пару электронов с отрицательным и положительным зарядами. Какова должна быть энергия, чтобы «родилось» ядро атома водорода, которое примерно в 2000 раз тяжелее электрона? Казалось бы, в 2000 раз больше энергии, необходимой для возникновения электрона, т. е. 2000 *Мэв*. Однако из простой теории столкновений следует, что этой энергии недостаточно. Для рождения «протонной пары», т. е. протона и «антипротона» — таинственного и давно предсказываемого отрицательно заряженного партнера протона, который был открыт совсем недавно,— потребуется значительно большая энергия, примерно 5000 *Мэв*. Такая «пара» возникает дополнительно к исходной налетающей бомбардирующей частице, т. е. является будто бы «материей ниоткуда»; на самом деле масса пары возникла за счет кинетической энергии налетающей частицы.

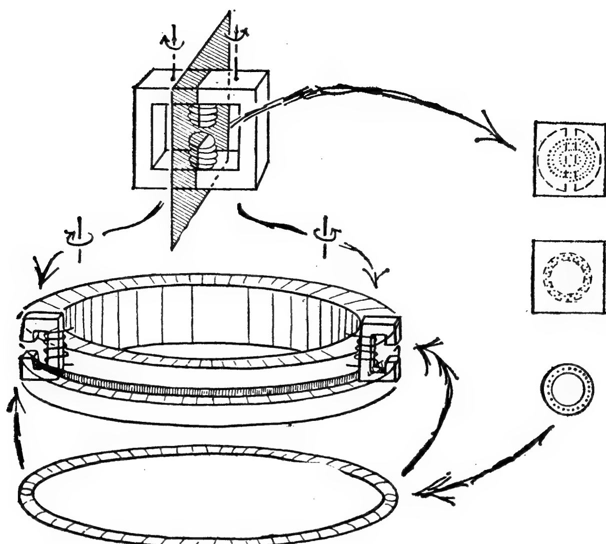
При столкновениях ионов с ядрами рождаются и другие элементарные частицы. Это *мезоны*, обладающие различными массами, промежуточными между массой электрона и массой протона и электрическими зарядами $-e$, 0, e. Как оказалось, эти странные короткоживущие частицы играют важную роль, связывая ядра воедино, и физики-ядерщики принялись тщательно изучать их свойства. Вместо того чтобы ждать, пока несколько таких мезонов появится в космических лучах, мы можем сами производить их, бомбардируя различные мишени ионами высоких энергий из ускорителей. Но для создания плотных потоков мезонов необходимы ионы с энергией от 500 до 1000 *Мэв* или даже больше. Таким образом, в этой новой и очень важной области появляется новая единица [1] энергии — *Бэв* (биллион электронвольт).

[1] Хотя *Мэв* был впервые использован для обозначения «миллиона электронвольт», строгие ученые-стилисты прочитали это сокращение как «мегаэлектронвольт». По новому соглашению, 1000 *Мэв* называют «1 *Гэв*», где буква *Г* происходит от слова «гигантский».

Кольцевые ускорители

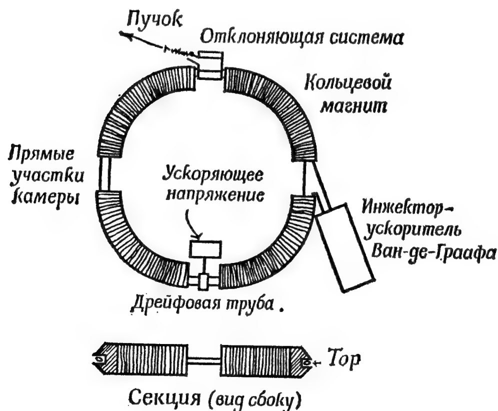
Чтобы построить циклотрон, ускоряющий ионы до энергии в несколько *Бэв*, необходимо затратить слишком много металла на магниты. А нельзя ли сделать так, чтобы магнит находился только вокруг наибольшей устойчивой орбиты, т. е. чтобы посреди магнита было большое, диаметром в десятки метров, отверстие, а камера имела форму бублика? Можно, такова конструкция кольцевых ускорителей. Некоторые из них уже построены и действуют, причем получили специальные названия: «космотрон», «бэватрон» и т. д. Их гигантские кольцевые магниты собраны из многих С-образных тонких секций. Между «челюстями» магнита помещена вакуумная камера в форме бублика. Один дуант расположен внутри короткой экранированной «дрейфовой трубы», а другим является вся оставшаяся часть бублика. Ионы ускоряются переменным электрическим полем, создаваемым в зазорах у концов дрейфовой трубы. Частицы, которые должны ускоряться такими машинами, ионизуются и предварительно ускоряются до энергий в несколько *Мэв* малыми ускорителями, типа генератора Ван-де-Граафа. Затем они инжектируются в бубликообразную камеру и вращаются внутри нее, приобретая после каждого оборота дополнительную энергию за счет электрического поля, создаваемого высокочастотным генератором. Поскольку теперь область движения ионов ограничена тороидальной, т. е. в виде бублика, камерой, при увеличении энергии ионы не могут переходить на окружности большого радиуса, как в циклотроне. Вместо этого с ростом энергии ионов должно меняться магнитное поле, удерживающее их на данной орбите. Вначале, когда ионы только инжектируются в камеру и, следовательно, их энергия мала, магнитное поле тоже мало. По мере увеличения скорости частиц должно увеличиваться и магнитное поле, чтобы ионы постоянно двигались по одной и той же орбите. После миллиона (или около этого) оборотов внутри камеры энергия ионов достигает заданного максимального значения; отклоняющая система выводит ионы для бомбардировки мишеней. Затем магнитное поле уменьшается до первоначального значения, ускоритель готов принять следующую порцию инжектируемых ионов.

Куда деть энергию, запасенную огромным магнитом, когда после цикла ускорения необходимо уменьшить магнитное поле? Нельзя допустить, чтобы она бесполезно терялась, а потом дорогой ценой снова производить ее для ускорения очередной группы частиц. Следовательно, ее нужно сберечь, используя либо огром-



Фиг. 116. Кольцевой ускоритель.

Гигантский кольцевой магнит построен из множества тонких С-образных секций. Камера в виде бублика помещается между «челюстями» кольцевого магнита.



Фиг. 117. Кольцевой ускоритель.

Быстрые ионы, предварительно ускоренные на установках типа генератора Ван-де-Граафа, инжектируются в кольцевой ускоритель, совершают в нем около миллиона оборотов (энергия их при этом достигает нескольких *Бэв*) и затем отклоняющей системой выводятся наружу.

ные маховики, либо систему гигантских конденсаторов и дросселей (энергия магнита в первом случае запасается в виде механической, а во втором — в виде электромагнитной энергии).

Так как ионы все время движутся по одной и той же орбите, частота генератора должна меняться: после каждого оборота энергия ионов увеличивается, и, следовательно, возрастает, хотя и не намного, их скорость. Поэтому должны быть специальные схемы, которые согласованно увеличивали бы частоту генератора и напряженность магнитного поля. Такие схемы успешно разработаны; большие машины, использующие их, ускоряют ионы до энергии 5 *Бэв* и более. При столкновении протонов такой высокой энергии (масса протонов при этом увеличивается примерно в 6 раз) с ядрами мишени образуются целые пучки мезонов и даже антипротоны, свойства которых теперь исследуются.

Задачи к главе 42

Задачи 1, 2. Предварительные задачи (на последней странице предыдущей главы)

Задача 3. Циклотрон и альфа-частицы

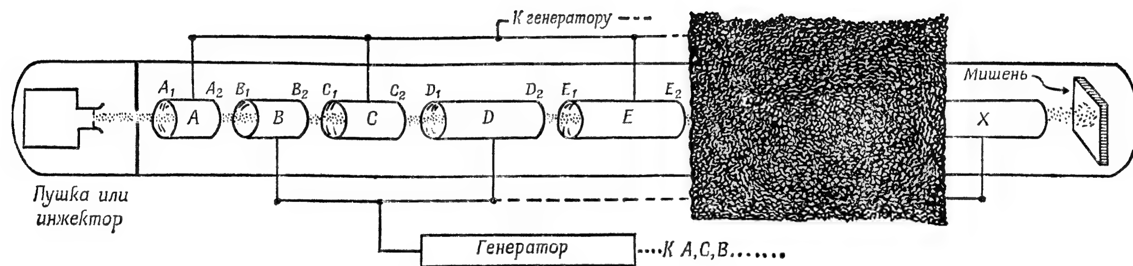
Предположим, что циклотрон, рассчитанный для ускорения протонов, используется для ускорения альфа-частиц, являющихся дважды ионизованными атомами гелия He^{++}, *т. е. ядрами атомов гелия, масса которого в 4 раза, а заряд в 2 раза больше, чем у протона. Магнитное поле циклотрона не меняется.*

а) Как следует изменить, если нужно вообще, частоту генератора?

б) Какой будет кинетическая энергия альфа-частиц по сравнению с расчетной кинетической энергией протонов? (Релятивистскими поправками пренебрегите.)

Задача 4. Линейный ускоритель

Представим, что «спиральная» траектория ионов в циклотроне развернута в прямую линию. Тогда, не принимая во внимание магнит, циклотрон превратится в «линейный ускоритель». Подобные машины сконструированы и хорошо работают, но очень дороги. Для движения ионов необходимо строить очень длинные трубы, откачанные до высокого вакуума. Ионы создаются в одном конце трубы, ускоряются при движении вдоль трубы и попадают на мишень в противоположном конце. Частицы ускоряются электрическим полем, создаваемым с определенными интервалами вдоль трубы. В одном из вариантов линейного ускорителя внутри вакуумной трубы располагается серия металлических цилиндров A, B, C, D, E, ..., *удлиняющихся по мере удаления от ионного источника, которые экранируют ионы при их движении внутри цилиндров и, обладая разным потенциалом, создают ускоряющее электрическое поле в узких щелях между собой. Для этого цилиндры через один, т. е.* A, C, E,



Фиг. 118. К задаче 4. Линейный ускоритель.

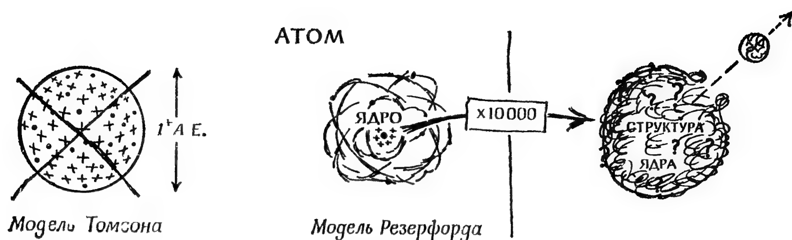
..., соединены с одним полюсом высокочастотного генератора, а лежащие между ними цилиндры B, D, . . .— с другим.

а) Как связаны между собой расстояние между ускоряющими промежутками A_2— B_1, B_2— C_1, ..., скорость ионов (постоянная внутри цилиндров) и частота генератора, если ионы влетают в каждый ускоряющий промежуток в тот момент времени, когда электрическое поле в нем максимально?

б) Как должны быть расположены ускоряющие промежутки (т. е. как нужно менять длины цилиндров), чтобы происходило ускорение медленных ионов из состояния покоя при постоянной частоте генератора?

в) Как должны быть расположены ускоряющие промежутки (частота генератора постоянна), чтобы ускорялись очень быстрые частицы (например, электроны, предварительно ускоренные до энергий в несколько Мэв)?

ГЛАВА 43 • ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА



Фиг. 119.

«Цель научного и инженерного поиска — увеличить и улучшить наши знания об окружающем мире. Постоянное стремление добыть эти знания вызвано либо простым желанием постичь законы природы, либо желанием использовать силы природы для улучшения материальных условий жизни человека. Оба эти стремления можно грубо охарактеризовать как жажду познавать и стремление использовать. В ученом преобладает первое, в инженере — второе. Это различие в мотивах продолжает существовать, хотя методы и специфические задачи науки и инженерного дела становятся все более схожими».

«Хотя все наши научные и технические знания основаны на наблюдении, эксперименте и логическом анализе, накапливались они двумя различными путями в соответствии с двумя различными стремлениями, о которых я упомянул выше. Технические науки всегда были более эмпиричны. Инженера или изобретателя прежде всего интересует практическая сторона дела. Если он способен создать машину или придумать процесс, которые дадут ему желаемый результат, то его может и не интересовать, почему все так происходит. Но как раз это «почему» и волнует ученого. Часто для того, чтобы как-то продвинуться в понимании, ученому необходимо упростить условия решаемой им задачи. Ему приходится сократить число переменных. Но, делая это, он часто оказывается изучающим нечто, что не имеет непосредственного отношения к практической стороне жизни. Исторически наука развивалась, обходя проблемы, слишком трудные для понимания. Прогресс же в технических науках происходил на основе успехов в использовании определенных процессов или машин, причем независимо от того, все ли при этом вполне понятно. Для инженера на первом месте польза от машины или процесса, для ученого — понимание...»

«За последние пятьдесят лет изменились связи как между отдельными науками, так и между наукой и техникой. Благодаря возросшему объему научных знаний и эффективности научных методов стало возможным плодотворное применение методов и знаний одной науки в другой... За это же время технические науки стали настолько сложными, что одними только эмпирическими методами в них уже не обойтись. Короче говоря, стало не только возможным, но и необходимым использовать науку в инженерном деле. Различие в стремлениях пока еще остается и часто оказывается решающим, но методы и задачи становятся все более и более похожими».

Генри Д. Смит

«Атомная энергия»? «Превращения»?

Открытие радиоактивности вызвало много волнующих вопросов. α-, β-, γ-лучи уносят громадную энергию из атома. Нельзя ли воспользоваться этими богатыми запасами энергии, запрятанными в радиоактивных атомах?

Исходный радиоактивный элемент превращается в совершенно другой дочерний элемент. Нельзя ли извлекать из этих превращений пользу, скажем, превращая свинец в золото? Для того чтобы добиться этого, необходимо уметь управлять такими радиоактивными превращениями: ускорять уже известные или заставлять происходить новые. Вначале экспериментаторы пытались воздействовать на радиоактивные превращения разными способами. Однако скоро они убедились, что радиоактивная неустойчивость ряда элементов неизменна и не поддается воздействию, и наоборот: стабильность нерадиоактивных элементов в той же степени неуязвима. Эксперименты продолжались, и теперь уже известно, как добиться успеха: *использовать бомбардирующие частицы высоких энергий*. Если посмотреть, какие энергии для этого необходимы, то станет ясно, почему первые попытки потерпели неудачу.

Энергии радиоактивных превращений

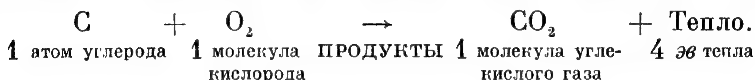
α-, β- и γ-лучи — основные компоненты радиоактивного распада — возникают с энергиями в несколько *Мэв*. Быстрая α-частица в воздухе на пути 50 *мм* создает 200 000 пар ионов. Из расчета примерно 30 *эв* на одну пару ионов получается 6 000 000 *эв* [1].

[1] При замедлении в веществе вплоть до остановки α-частицы тратят свою кинетическую энергию на ионизацию атомов; при последующей нейт-

Эти лучи не могут выходить из внешних областей распадающегося атома, из далеких от ядра частей электронного облака: для образования альфа-частицы там недостаточно массы. Электрическое поле не способно испускать β-лучи; оно к тому же слишком слабо, чтобы родить какой бы то ни было луч с энергией в несколько миллионов электронвольт. Лучи могут выходить только из ядра. И чтобы повлиять на их образование, нужны сравнимые по величине энергии, скажем в несколько миллионов электронвольт. Это рушит любые надежды на создание радиоактивности простым разогревом: кинетическая энергия молекул газа при комнатных температурах примерно равна $^{1}/_{30}$ *эв*, а при температуре раскаленной добела печи — всего лишь около $^{1}/_{3}$ *эв*. Вот если бы создать печь с температурой внутренних частей звезды, тогда другое дело.

Энергии химических превращений

Энергии химических превращений также невелики: в этих превращениях молекула теряет или приобретает несколько электронвольт. Например, при сгорании угля выделяется тепло:



При сгорании других видов топлива получается примерно то же самое. Даже при взрыве — всего лишь очень быстром сгорании в ограниченном объеме, при котором мгновенное выделение тепла создает волну сжатия в воздухе,— выделяемая энергия в расчете на одну молекулу еще очень мала. При взрыве смеси бензина с кислородом выделяется от 40 до 50 *эв* на *одну молекулу* [1]. На каждую сгоревшую молекулу тринитротолуола приходится 30 *эв*. Громкий хлопок при взрыве кислорода с водородом происходит при выделе-

---

рализации ионов большая часть их энергии переходит в тепло. Следовательно, радиоактивный материал в пробирке является источником тепла. Так, радиоактивность скал не дает Земле остыть.

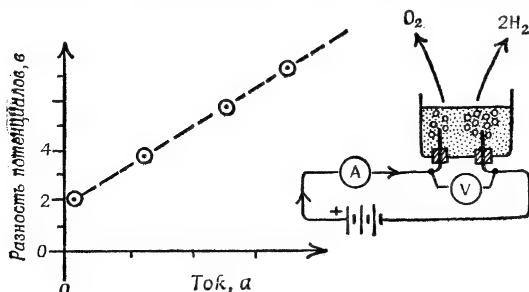
Пусть у вас 2 *кг* α-активного элемента. Спустя время его полураспада 1 *кг* распадется, выделив, скажем, 500 000 000 больших калорий. Сравните это количество с тем, которое дает обычное топливо, такое, как уголь или нефть,— от силы 10 000 больших калорий на 1 *кг*. 1 *кг* радиоактивного материала дает такое же количество тепла, как 50 *т* угля. Правда, это происходит за время его жизни.

[1] При сгорании бензина на его молекулу приходится бóльшая энергия, чем на атом углерода при сгорании угля, поскольку она крупнее. При сгорании 1 *кг* бензина и 1 *кг* угля выделяются сравнимые количества тепла. Правда, сжечь уголь так быстро, чтобы это происходило со взрывом, трудно.

нии всего лишь 2 *эв* в расчете на одну молекулу образовавшейся воды [1]. Эти утверждения следуют из измерений поглощенного или выделенного тепла в химических реакциях, но они согласуются с результатами измерений путем бомбардировки атомов электронами. Можно обстреливать нейтральные атомы и молекулы медленными электронами. Электроны с энергией в несколько электронвольт рассеиваются на атомах упруго, но если мы будем стрелять электронами с большей энергией, в несколько десятков электронвольт, они выбьют у «жертвы» электрон и сделают из нее положительный ион. Для атомов натрия или калия, которые расстаются со своими электронами легко, на это требуется всего 4 или 5 *эв*, для атома водорода — 13,6 *эв*, для *молекулы* водорода — 15 *эв*, для атома гелия — 25 *эв*, и около 80 *эв* необходимо для того, чтобы одним залпом выбить *оба* электрона из атома гелия и сделать из него α-частицу. Считается, что химические реакции состоят в захвате и обмене внешними электронами, и поэтому приятно получить еще одно подтверждение этого: в процессах с участием в них электронов поглощается или выделяется энергия от нескольких электронвольт до нескольких десятков электронвольт. Внутрь электронного облака более тяжелых атомов, имеющих много электронов, можно заглянуть поглубже, если стрелять более быстрыми электронами и возбуждать рентгеновские лучи или стрелять рентгеновскими лучами и срывать внутренние электроны. Но даже в этом случае мы имеем дело с энергиями только в

---

[1] Следовательно, можно ожидать, что для расщепления молекулы воды на водород и кислород потребуется 1—2 *эв*. Вот почему в опыте по электролизу воды «прямая закона Ома» (гл. 32, опыт 18) не проходит через начало



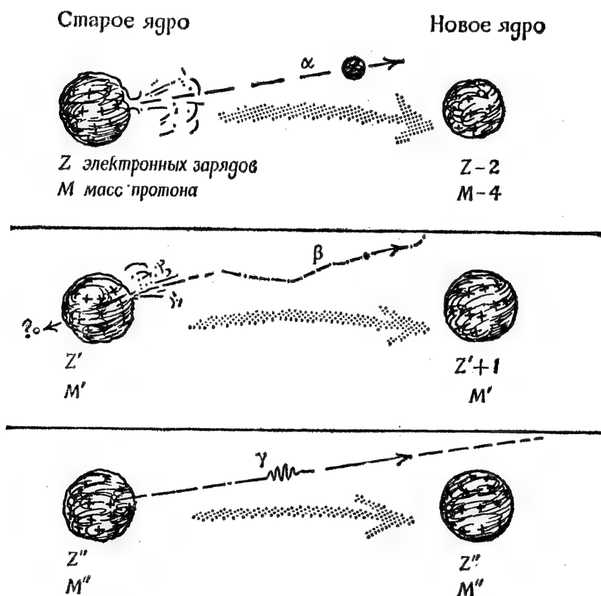
Фиг. 120.

координат, а отрезает на вертикальной оси начальную разность потенциалов 1—2 *в*. Это соответствует как раз той энергии, которую 1 *кулон* заряда переводит *из* электрической *в* химическую — э.д.с. «водяной батареи» шиворот-навыворот.

десятки тысяч электронвольт или около этого (если, конечно, не переходить к самым тяжелым ядрам, когда необходимы энергии около 100 000 *эв*).

Химия и радиоактивность

Итак, мы уподобили α- и β-лучи ракетам, стартующим из ядра. Когда они вылетают из ядра, масса последнего меняется: альфа-частица уносит массу, равную 4 массам атома водорода. Бета-частица уносит ничтожную массу, которая снова восстанавливается,



Фиг. 121. Радиоактивные превращения.

когда образовавшийся атом захватывает недостающий ему внешний электрон. Заряд ядра при этом также меняется. Альфа-частица уносит заряд $+2e$, уменьшая тем самым заряд ядра (атомный номер понижается) на 2 единицы. Бета-частица уносит заряд $-e$, увеличивая заряд ядра на $+e$. При этом атомный номер ядра увеличивается на 1.

Изменения атомного номера Z ведут к такому же изменению в числе внешних электронов нейтрального атома и тем самым к изменению его химических свойств, которые определяются внешними электронами. Число же и распределение этих электронов определяются зарядом ядра Ze, и мы бессильны превратить один химический элемент в другой, не имея возможности изменить заряд ядра. Мечта алхимиков о превращении свинца ($Z=82$) в золото ($Z=79$) осуществилась бы, если бы можно было отобрать у каждого ядра свинца по три $+e$ заряда. При радиоактивном распаде элементов заряд их меняется. Нельзя ли *вызвать* или хотя бы *повлиять* на такие изменения? Первые эксперименты показали: нет, и теперь ясно, что надеяться на это было безнадежно, пока не стали доступны для бомбардировки снаряды с очень высокой энергией. Масса электронов очень мала: они, словно кометы, легко заворачиваются ядром. Альфа-частицы несут «++» заряд и поэтому отталкиваются ядром. Они *вылетают* из радиоактивного ядра с кинетической энергией в несколько миллионов электронвольт. Поэтому для их возвращения назад нужна такая же по величине энергия. (Бесполезно использовать для бомбардировки нейтральный атом: уже на ранней стадии сближения с ядром его электроны отрывались бы от него и ядро отталкивалось бы подобно α-частице.) Однако некие надежды возлагались на бомбардировку быстрыми альфа-частицами легких атомов с малым атомным номером, т. е. с малым зарядом ядра. Они-то и привели к первым успехам в искусственном превращении элементов.

Искусственный распад. Превращения, осуществленные человеком

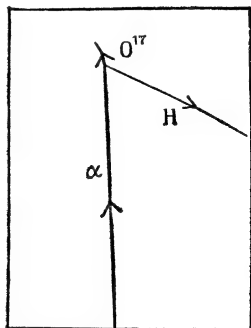
Спустя четверть века после открытия радиоактивности Резерфорду удалось сокрушить ядра нескольких атомов, облучая их быстрыми альфа-частицами. Альфа-частицы, выпущенные из радиоактивного источника, пронизывали газообразный азот. В конце своего пробега альфа-частицы иногда выбивали вперед более легкие частицы. Выбитые частицы закручивались с помощью магнитного поля, и тем самым можно было убедиться, что это протоны [1] H^+. Несмотря на то что эти события были редкими, они

---

[1] Начиная с этого места, мы всегда будем ядро атома водорода называть *протоном*, современным названием этой фундаментальной атомной частицы. Протон, ион атома водорода H^+, ядро атома водорода ${}_1H^1$— все это названия одной и той же частицы: атома водорода без его единственного электрона.

были сфотографированы. Около четверти миллиона треков в камере Вильсона было снято на кинопленку и обнаружено семь таких событий (фиг. 122). На снимках была видна отскочившая легкая частица, несомненно протон, и короткий трек атома отдачи, но *исходная α-частица на них уже видна не была*. Измерения углов





Фиг. 122. Фотоснимки в камере Вильсона.

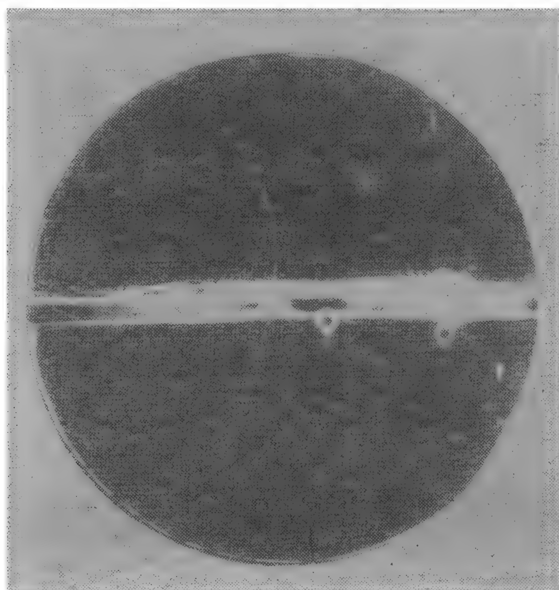
Превращения ядра при его бомбардировке. Фотоснимок Блэккетта, демонстрирующий открытие Резерфорда. Альфа-частица сталкивается с ядром азота и исчезает. В результате возникает ядро отдачи кислорода и протон (ядро водорода) (P. M. S. Blackett, Proc. Roy. Soc. Lond.).

и длины треков показали, что при столкновении сохранялся лишь момент количества движения, но не кинетическая энергия.

Запишем теперь это следующим образом:

альфа-частица	сталкивается	испускается	получается
(ядро He)	с ядром атома азота	протон (ядро H)	новое
(заряд $= +2e$)	(заряд $= +7e$)	(заряд $= +e$)	ядро????? (заряд $= 7e + 2e - 1e$)
(масса $= 4$ массы протона)	(масса $= 14$)	(масса $= 1$)	(масса $= 14 + 4 - 1$)

Таким образом, новое ядро должно иметь заряд $+8e$, характеризующий кислород, и массу 17, до некоторой степени необычную, но не такую уж неожиданную для кислорода. (С помощью масс-



Фиг. 123. Позитрон.

Открытие Андерсоном положительного электрона. Трек пронизывает слой свинца. В направлении, перпендикулярном фотографии, от читателя приложено сильное магнитное поле. (Копия с фотоснимка К. Д. Андерсона, хранящегося в музее науки в Лондоне.)

спектрографа было показано, что в обычном кислороде помимо атомов O^{16} всегда присутствуют более тяжелые атомы O^{17}.)



Фиг. 124. Образование пар. Рождение вещества.

Отрицательные и положительные электроны рождаются γ-квантом, пришедшим снизу. В направлении, перпендикулярном фотоснимку, приложено сильное магнитное поле (W. A. Fowler, E. R. Gaerttner, C. C. Lauritsen).



Фиг. 125. Распад ядра, вызванный нейтроном.

Нейтрон, столкнувшись с ядром азота, поглощается им. Образующееся ядро испустило α-частицу и испытало отдачу. Первичный нейтрон, трек которого на фотоснимке не виден, пришел от источника в направлении, указанном стрелкой (N. Feather, Proc. Roy. Soc. Lond.).

С тех пор как появилось сообщение Резерфорда, осуществлено много таких «ядерных» реакций, сначала путем бомбардировки существующими в природе снарядами (α-частицами), а затем более мощными снарядами — протонами, ускоренными на больших машинах, и, наконец, еще более эффективными снарядами — лишенными заряда нейтронами. Эти ядерные превращения составляют обширную область ядерной «химии».

Ядерная «химия»

Для ядерных реакций используется теперь принятая в химии запись уравнений. Например, ядро атома радия обозначается его химическим символом Ra, а атомный номер, т. е. заряд ядра, равный +88 зарядам электрона, и масса атома, равная 226 (в шкале, в которой H≈1, O=16), записываются так: ${}_{88}Ra^{226}$. Распад атома радия с испусканием альфа-частицы и превращением его в атом радона записывается следующим образом:



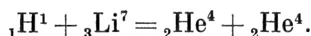
$$ {}_{88}Ra^{226} = {}_{86}Rn^{222} + {}_{2}He^{4}. $$

Открытое Резерфордом превращение азота записывается следующим образом:



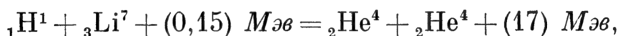
$$ {}_{2}He^{4} + {}_{7}N^{14} = {}_{8}O^{17} + {}_{1}H^{1}. $$

Первая «большая машина» была не очень большой: она ускоряла протоны только до энергии 150 000 *эв*. Но уже эти протоны могли проникать в атомы литиевой мишени и раскалывать ее ядра. Фотоснимки в камере Вильсона подтвердили предположение о том, что «протон, попадая в атом лития, рождает две альфа-частицы высокой энергии»:



$$ {}_{1}H^{1} + {}_{3}Li^{7} = {}_{2}He^{4} + {}_{2}He^{4}. $$

Протоны налетают с энергией около 150 000 *эв*. Каждая родившаяся альфа-частица имеет энергию 8 500 000 *эв*, т. е. обе частицы — 17 *Мэв*. Следовательно, можно сказать, что



$$ {}_{1}H^{1} + {}_{3}Li^{7} + (0{,}15)\ \text{Мэв} = {}_{2}He^{4} + {}_{2}He^{4} + (17)\ \text{Мэв}, $$

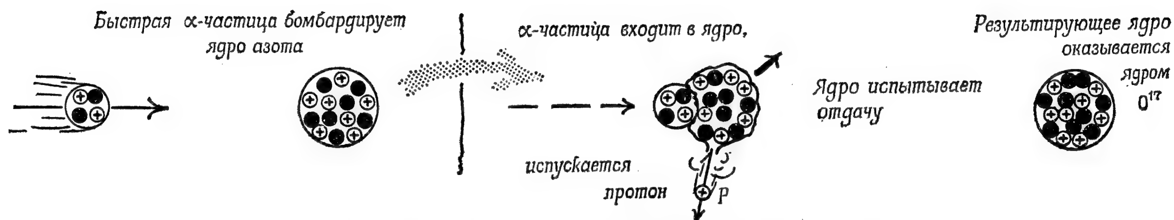
где *Мэв* означает миллион электронвольт. Альфа-частицы рождаются с кинетической энергией, гораздо большей, чем приносит с собой протон. Когда они сталкиваются с молекулами воздуха, то теряют свою энергию на ионизацию атомов, а также время от времени на столкновения с ядрами. Эта энергия в основном переходит в тепло. Сравните получающиеся количества тепла — 17 000 000 *эв* от одного атома лития с 4 *эв*, приходящимися на один атом сгоревшего угля.

НЕЙТРОН	n		$_{1}n^{1}$
ВОДОРОД	p	Ядро водорода – протон	$_{1}H^{1}$
	d	Ядро тяжелого водорода-дейтрон	$_{1}H^{2}$
ГЕЛИЙ	α	Альфа-частица ядро гелия	$_{2}He^{4}$
ЛИТИЙ		Ядро лития $_{3}Li^{7}$ (есть изотоп с массой 6)	
КИСЛОРОД		Ядро кислорода $_{8}O^{16}$ (имеется также редкий изотоп O^{17})	
	8 ⊕, 8 ●	Более простое представление ядра кислорода	
ХЛОР: 17 ⊕, 18 ● — 76%; 17 ⊕, 20 ● — 24%		Есть два изотопа $_{17}Cl^{35}$ и $_{17}Cl^{37}$, смесь которых обуславливает атомный вес обычного хлора, равный 35,45	
УРАН: 92 ⊕, 143 ● — 0,7%; 92 ⊕, 146 ● — 99,03%		Изотопы урана (оба изотопа нестабильны, с большим периодом полураспада)	

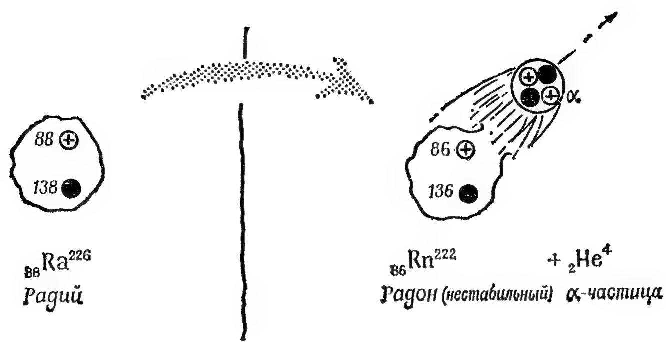
Фиг. 126. Схематическое изображение атомных ядер.

(Замечание. Остальная часть атома — его электронное облако — в выбранном по схеме масштабе простирается на десятки метров от рисунка.)

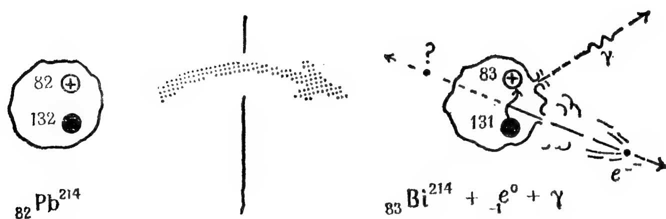
Изображение ядерных событий, представленных на последующих рисунках, заимствовано из книги «Classical and Modern Physics», by H. White, D. Van Nostrand Comp., Princeton, 1940



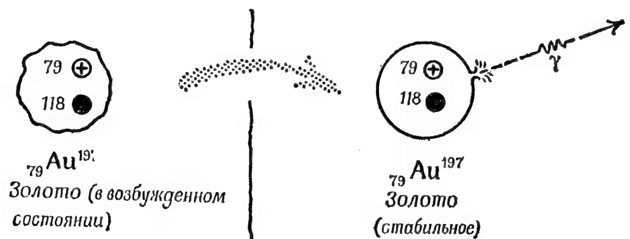
Фиг. 127. Первое искусственное расщепление ядра.



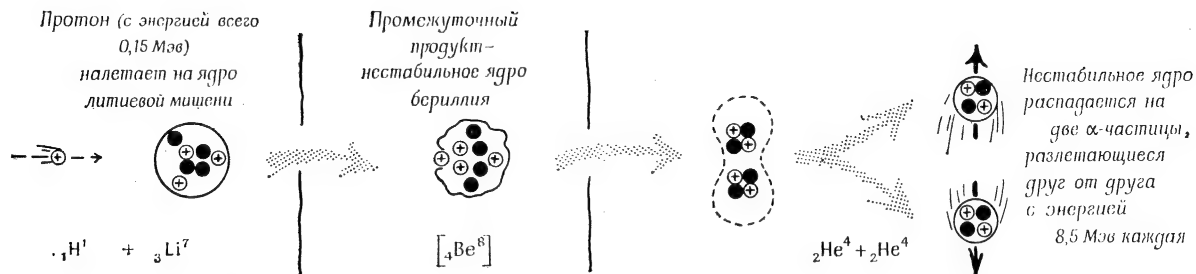
Фиг. 128. Излучение альфа-частицы.



Фиг. 129. β-излучение.



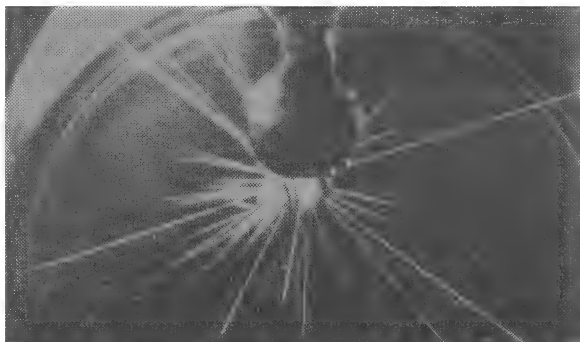
Фиг. 130. γ-излучение.



Фиг. 131. Деление атома лития при бомбардировке его протонами.

Ядерная энергия. Никакой надежды на практическое использование

В данном случае имеет место гигантское выделение «ядерной энергии». В отличие от огромной энергии, получаемой при естественной радиоактивности атомов, ядерной энергией можно управлять: ее можно получать при помощи бомбардировки протонами. Нельзя ли на ней построить электростанцию? Нет! Хотя энергии выделяется и много, при этом едва лишь окупится стоимость деления одного атома. Во-первых, необходим ускоритель,



Фиг. 132. Фотоснимок в камере Вильсона.

«Деление» ядра атома лития на две α-частицы при бомбардировке ядрами водорода на ускорителе. Снимок приведен в случае бомбардировки ядрами *тяжелого* водорода (дейтронами H^2), а ядра лития были ядрами *легкого* лития Li^6 Видно несколько пар α-частиц, разлетающихся к стенкам камеры. (В этой реакции α-частицы образуются с энергией 11 *Мэв* каждая.) Видны также более короткие треки α-частиц, образующихся наряду с нейтронами в других ядерных реакциях.

постройка и эксплуатация которого весьма дороги. Во-вторых, только один из десятков тысяч протонов способен расщепить атом лития, поэтому каждый «удачный» протон обходится гораздо дороже стоимости его кинетической энергии. Итак, получение энергии слишком дорого и выход ее слишком мал, чтобы это было выгодно. Вот если бы энерговыделение было *самоподдерживающимся*, т. е. если бы каждый взрывающийся атом лития вызывал деления соседних атомов, подобно тому как это происходит при горении обычного топлива, когда одна частичка поджигает другую, вот тогда бы существовал удивительный источник тепла. Тогда частичка лития, «зажженная» протоном, давала бы начало

целой цепи реакций деления [1], где выделялась бы энергия в количестве, которое даже не снилось ни одному поставщику топлива. Но один атом лития не может «зажечь» другой атом: при распаде не возникает протона, способного это сделать.

По тем же причинам нет никакой надежды на практическое использование многих других ядерных превращений, полученных с помощью более мощных ускорителей. Однако изучение этих ядерных превращений дало исключительно ценную *информацию* — начала проясняться внутренняя структура ядер.

Количественное изучение этих реакций показало, что масса вещества точно не сохраняется. Если составить суммы масс *вещества*: вначале сумму масс ядер мишени и бомбардирующей частицы, а затем сумму масс ядер образующихся частиц, то сумма масс ядер, вступающих в реакцию, не совпадает с таковой после реакции. Но если точно так же, как и веществу, *энергии* приписать массу, то баланс окажется правильным: полная сумма [МАССА ВЕЩЕСТВА+МАССА ЭНЕРГИИ] одинакова до и после каждого ядерного превращения.

Масса и энергия. $E = mc^2$

С самого начала нашего столетия существовало мнение, что энергия обладает массой [2]. В гл. 26 изложена довольно правдоподобная история, на основании которой можно предположить, что любой ЭНЕРГИИ E отвечает МАССА величиной E/c^2. В настоя-

---

[1] Чтобы получить простейшую цепную реакцию, поднесите зажженную спичку к крайней спичке в обойме бумажных спичек. *Разгоняющаяся* цепная реакция получится, если поджечь стопку таких обойм или полный коробок спичек.

[2] Некоторые физики говорят: «масса — это энергия» или «энергия — это масса» и даже «вещество — это энергия». При этом смешиваются свойства и то, что ими обладает, а это едва ли помогает стать на научную точку зрения. Энергия имеет массу точно так же, как алюминий имеет массу, как медь имеет оранжевый цвет. Настоящие же ученые, зная, что переводной множитель c^2 (между измеренными массами и энергиями в обычных единицах) есть универсальная постоянная, считают, что разумнее говорить, что масса и энергия — это разные меры одной и той же сущности. Так, вещество представляется нам в виде частиц (например, атомы, электроны) с определенной массой; и даже если нам нравится представлять его в виде массы определенной энергии, заключенной внутри частиц, то, становясь на эту точку зрения, не следует сводить вещество к энергии. Иногда оказывается, что вещество (две частицы) исчезает, а что-то обладающее массой (излучение) возникает — и это превращение вещества в *излучение* можно легкомысленно объявить как «превращение вещества в *энергию*».

щее время в результате многочисленных экспериментальных проверок выяснено, что энергия в любой форме *имеет* массу E/c^2 и поэтому соотношение $E=mc^2$ является универсальным.

Реакция деления атомов лития послужила прекрасным подтверждением точки зрения, согласно которой энергия обладает массой. Массы частиц, участвующих в этом событии, были тщательно измерены с помощью масс-спектрографа. В стандартной шкале масс, в которой масса атома O^{16} равна 16,0000, частицы имели следующие массы:

Бомбардирующая частица: протон ${}_1H^1$,	$M=1{,}0076$
мишень: ядро лития ${}_3Li^7$,	$M=7{,}0165$
ПОЛНАЯ МАССА ДО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	8,0241
продукты взаимодействия:	
альфа-частица ${}_2He^4$,	$M=4{,}0028$
альфа-частица ${}_2He^4$,	$M=4{,}0028$
ПОЛНАЯ МАССА ПОСЛЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	8,0056

Полная масса после события несколько меньше, чем до него, если сложить массы частиц точно так же, как складываются массы частичек обычного вещества. Если теперь учесть массы, соответствующие начальным и конечным значениям кинетических энергий, то можно сказать, что каждая такая масса равна кинетической энергии/c^2. Затем следует выразить результаты в шкале масс, в которой массе O^{16} соответствует 16,0000 или атому водорода — масса 1,0081. Для того чтобы выразить результат в новых единицах измерения, вычислите энергию, которой соответствует точно такая же масса, как масса протона, и выразите ее сначала в джоулях, а затем в электронвольтах.

Вычисление переводного множителя. Масса протона равна $1{,}67\cdot 10^{-27}$ *кг* [1]. Энергия, которой соответствует такая масса,

---

[1] Из эксперимента Милликена следует, что $e=1{,}60\cdot 10^{-19}$ *кулон*. В опыте по электролизу воды или из измерений зарядов положительных ионов в газоразрядной трубке получается, что $e/M=9{,}57\cdot 10^7$ *кулон/кг*.

Простое вычисление дает

$$M=\frac{1{,}60\cdot 10^{-19}}{9{,}57\cdot 10^7}\ \textit{кулон}/(\textit{кулон}/\textit{кг})=1{,}67\cdot 10^{-27}\ \textit{кг}\ \text{для протона.}$$

равна

$$E = Mc^2 = (1{,}67 \cdot 10^{-27}\ \textit{кг}) \cdot (3{,}00 \cdot 10^8\ \textit{м/сек})^2,$$
$$= 1{,}50 \cdot 10^{-10}\ \textit{кг} \cdot \textit{м}^2/\textit{сек}^2,$$

или $(\textit{кг} \cdot \textit{м}/\textit{сек}^2) \cdot \textit{м}$,

или *ньютон·м*, или *дж*.

Любая энергия, кинетическая, потенциальная и т. д., равная $1{,}50 \cdot 10^{-10}$ *дж*, обладает массой $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ *кг*, т. е. массой протона. Но обычно энергии ядерных превращений выражаются в *эв* или *Мэв*. Вспомним здесь, что энергия в 1 *эв* равна энергии, приобретаемой зарядом, равным заряду электрона, т. е. $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ *кулон*, прошедшим разность потенциалов в 1 *в*.

Следовательно,

$$1\ \textit{эв} = (1{,}60 \cdot 10^{-19}\ \textit{кулон}) \cdot (1\ \textit{дж/кулон}),$$
$$= 1{,}60 \cdot 10^{-19}\ \textit{дж}.$$

Таким образом, энергия, которая обладает массой, точно такой же, как масса протона, равна

$$1{,}67 \cdot 10^{-27}\ \textit{кг} = \frac{1{,}50 \cdot 10^{-10}\ \textit{дж}}{1{,}60\ 10^{-19}\ \textit{дж/эв}}.$$

Расчет на основании этих точных данных дает для *энергии с массой протона значение, равное 938 Мэв.*

[*Лучший метод*. Метод, который использовался выше, хотя и наиболее прост для понимания, но не является наилучшим. (Заряд электрона использовался дважды, причем был скрыт тот факт, что он сокращается.) Более удачный метод следующий:

Энергия, соответствующая массе *М кг*, равна Mc^2, или $M(3{,}0 \cdot 10^8)^2$ *дж*.

1 *эв* равен

(заряд электрона, *е кулон*) (1 *дж/кулон*), или *е дж*.

Следовательно,

энергия, соответствующая массе *М кг*, равна

$$\frac{M\,(3{,}0 \cdot 10^8)^2}{e}\ \textit{эв}.$$

или

$$\frac{(3,0\cdot 10^8)^2}{e/M}\ эв.$$

Пусть M — масса протона, а e — заряд электрона, e/M — отношение заряд масса для ионов водорода, равное, как это следует из измерений в опыте по электролизу воды, 95 700 000 *кулон/кг* [1]. Тогда энергия, соответствующая массе, равной массе протона, составляет

$$\frac{(3,0\ 10^8)^2}{95\,700\,000}\ эв = \frac{9,0\cdot 10^{16}}{9,57\cdot 10^7}\ эв = 0,94\cdot 10^9\ эв \text{ или } 940\ Мэв.]$$

Атомные единицы массы и энергии. В настоящее время массы (относительные) выражаются в «атомных единицах массы», в которых масса O^{16} полагается равной 16,0000. В этой шкале единиц масса *атома* водорода равна 1,0081; масса протона, т. е. ядра водорода, равна 1,0081 — $^1/_{1840}$, что составляет 1,0076. Точные измерения с помощью масс-спектрографа дают следующие значения масс в этой шкале единиц:

	Масса атома	*Масса ядра*
Водород	1,0081	1,0076
Гелий	4,0039	4,0028
Литий	7,0182	7,0165
Кислород	16,0000 (по определению)	15,9957

В этой шкале единиц энергия, соответствующая массе в 1 единицу, несколько меньше 938 *Мэв*, приходящихся на массу протона, и равна 938·(1,0000/1,0076), т. е. 931 *Мэв*.

Этот переводной множитель играет очень важную роль при расчете выделяемой атомной энергии.

энергия 931 *Мэв* отвечает 1 атомной единице массы

(в шкале единиц, в которой масса O^{16} равна 16,0000).

Проверка соотношения $E=mc^2$ для реакции деления лития. Теперь, полагая, что 931 *Мэв* соответствует 1 а. е. м., можно записать массы, отвечающие кинетическим энергиям. Попробуем

---

[1] Так как заряд, переносимый 1 *киломолем*, равен 96 500 000, то отсюда 96 500 000 *кулон*/1,008 *кг*=95 700 000 *кулон/кг*.

сделать это в случае бомбардировки лития:

РЕЗУЛЬТАТ:

$$_1H^1 + {_3Li^7} + \underset{\text{к. э. протона}}{0{,}15\ \text{Мэв}} = ? = {_2He^4} + {_2He^4} + \underset{\text{к. э. } \alpha+\alpha}{17\ \text{Мэв}};$$

МАССЫ: $1{,}0076 + 7{,}0165 + \frac{0{,}15}{931}$ (масса, соответствующая кинетической энергии, в тех же единицах);

$= ? = 4{,}0028 + 4{,}0028 + \frac{17{,}0}{931}$ (масса, соответствующая кинетической энергии в тех же единицах);

$$1{,}0076 + 7{,}0165 + 0{,}0002 = ? = 4{,}0028 + 4{,}0028 + 0{,}0183;$$

ПОЛНЫЕ МАССЫ: $8{,}0243 = ? = 8{,}0239.$

Теперь полные массы гораздо ближе друг к другу по величине. Полная масса вещества изменилась с 8,0241 до 8,0056, т. е. *уменьшилась* на 0,0185. Масса, отвечающая *кинетической энергии*, изменилась с 0,0002 до 0,0183, т. е. на 0,0181. Это увеличение составляет 98% от потери энергии. Различие в 2% вполне укладывается в ту неопределенность, с которой производятся весьма сложные измерения кинетической энергии. Точному балансу должна была бы отвечать кинетическая энергия α-частиц, равная 0,0187: ее измеряемая энергия должна бы быть равной 17,4 вместо 17 *Мэв*. Обратите внимание на то, с какой точностью необходимо было измерить массы атомов для проведенной выше проверки соотношения $E = mc^2$. Первые успехи измерений на масс-спектрографе — доказательство существования изотопов с целочисленными массовыми числами и высокая точность химического анализа — далеко превзойдены. Теперь точные измерения на нем показывают, что массы атомов не являются целыми числами, кратными величине массы водорода, или какой-нибудь другой фундаментальной единице. Всегда существует небольшое отличие, имеющее глубокий смысл, если мы верим в соотношение $E = mc^2$, а мы верим в него. Проделано множество детальнейших проверок, подобных одной из первых — на литии, и все подтвердили его. Его подтверждают также странные события, в которых участвуют «позитроны» — электроны с положительным зарядом, рассмотренные в дальнейшем. Подкрепляемое теорией относительности и экспериментальными проверками, соотношение $E = mc^2$ используется для того, чтобы предсказать превращения энергии в других ядерных событиях. Можно даже предсказать огромное выделение энергии при распаде массивного ядра на два меньших — при делении и при объединении легких ядер в одно большое — при синтезе.

Структура ядра. Нейтрон

Прежде чем перейти к изучению свойств нейтрона, следует либо снова просмотреть задачи 20 и 21 к гл. 8, либо попытаться решить приводимую ниже более легкую задачу 1.

Задача 1. Потери кинетической энергии в упругом столкновении

Мобилизуйте свои знания и здравый смысл для ответа на следующие вопросы:

а) Шарик пинг-понга, летящий со скоростью 20 м/сек на север, ударяет по лбу стоящего слона. Пусть удар абсолютно упругий (нет потери кинетической энергии на тепло), а ступни слона лишены трения.
  1) Куда полетит шарик после удара — на юг или на север?
  2) Куда будет двигаться слон — на юг или на север?

б) Предположим, что шарик весит 2 г (0,002 кг), а слон — около 2000 кг. Оцените грубо (с точностью, скажем, 1%):
  1) Изменение импульса шарика.
  2) Изменение импульса слона (предполагая, что импульс сохраняется).
  3) Скорость слона после удара.
  4) Кинетическая энергия слона после удара.
  5) Кинетическая энергия шарика после удара.

в) Сохранит ли шарик большую часть своей кинетической энергии или же после удара разделит ее поровну со слоном?

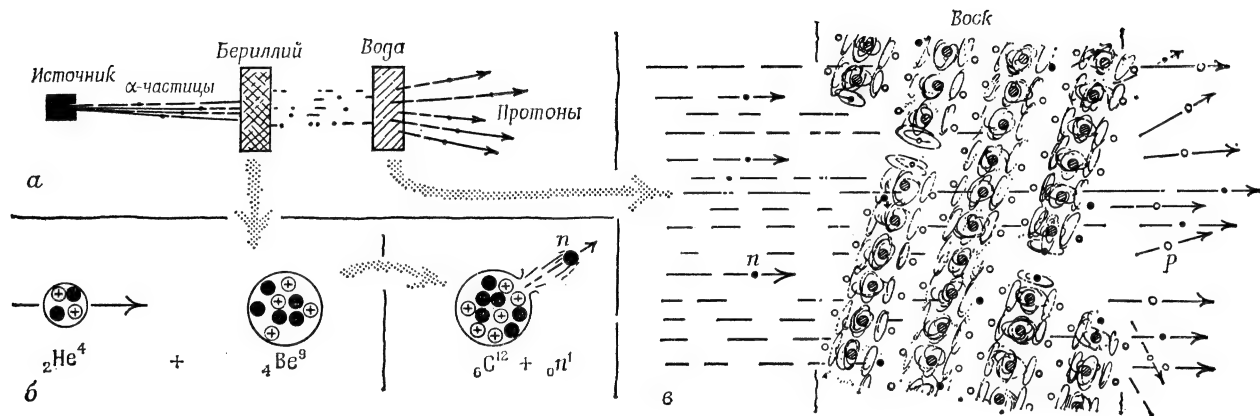
г) Поменяйте теперь массы местами: считайте, что слон очень быстро скользит в северном направлении и ударяет неподвижно висящий шарик от пинг-понга.
  1) По вашему мнению, сильно ли изменится движение слона после столкновения?
  2) Какую скорость, вы считаете, приобретет шарик после столкновения? (Чтобы ответить на этот вопрос, не прибегая к алгебраическим вычислениям, представьте себе, что вы мчитесь на слоне в тумане. Вам представляется, что слон покоится, а шарик налетает на вас и на слона.
  Как, по вашему мнению, движется шарик до столкновения? Каким будет казаться вам его движение после удара?
  Теперь вспомните, что слон движется, и скажите, как будет выглядеть движение шарика после удара с точки зрения стоящего на земле наблюдателя?)
  3) Останется ли кинетическая энергия слона после столкновения той же самой или она разделится поровну между слоном и шариком?

д) Предположим теперь, что массы слона и шарика одинаковы: абсолютно упругий шарик, движущийся в северном направлении, ударяет «в лоб» точно такой же шарик, но покоящийся.
  1) Как, на ваш взгляд, будут двигаться шары после столкновения? (Если вы сомневаетесь в ответе, попытайтесь поставить хотя бы грубый эксперимент и экстраполируйте его результат на идеальный случай.)
  2) Будет ли шар двигаться с первоначальной кинетической энергией, потеряет ли большую часть ее или же при ударе она разделится поровну между шарами?

е) Резюме. *Каково должно быть отношение массы налетающего тела к массе покоящегося, чтобы при упругом столкновении первое тело замедлилось?*

В 1930 г., когда строились первые большие ускорители, все теории строения атома ждали экспериментальной проверки. Модель атома, предложенная Резерфордом, была уже усовершенствована — внешние электроны уже не вращались по строго определенным планетарным орбитам, а слились в одно волновое облако, но тем не менее атом еще рисовался рыхлым, с крошечным положительным ядром. Поскольку из ядра могут вылетать электроны, протоны и альфа-частицы, думали, что каждое ядро состоит из протонов и электронов (причем альфа-частица рассматривалась как некоторое компактное образование). Но при таком описании ядро оказывалось неустойчивым. Подобное ядро, казалось, должно было скорее распасться, чем оставаться стабильным; электроны не должны были умещаться в ядре: они настолько легки, что длина их волны слишком велика для этого. Кроме того, существовали серьезные затруднения, связанные с необходимостью выполнения закона сохранения момента количества движения. Тогда-то и были открыты нейтроны. Они изменили все представления о строении ядра.

В ряде экспериментов по бомбардировке атомов получались странные результаты. Казалось бы, альфа-частицы должны (время от времени) выбивать протоны из ядра азота и некоторых других легких элементов. В этом смысле бериллий, очень легкий металл с $Z=4$, должен был быть многообещающим для использования его в качестве мишени. Но при бомбардировке бериллия альфа-частицами возникали какие-то странные лучи, которые не создавали ни ионов, ни треков в камере Вильсона. Может быть, γ-лучи? Но толстые листы свинца почти не задерживали эти лучи. Но, может быть, — это очень жесткие, глубокопроникающие γ-лучи? Тогда возникал серьезный вопрос: «Откуда взяться такой энергии?» В отличие от свинца блок из парафинового воска или бак с водой почти полностью поглощали эти загадочные лучи. Кроме того, лучи выбивали протоны из поглощающего их воска или воды. Если бы это были γ-лучи, то это находилось бы в серьезном противоречии с законом сохранения энергии и импульса. Тогда коллега Резерфорда Джеймс Чэдвик написал в журнал «Нейчур» короткое сообщение, ставшее вскоре широко известным. Он обратил внимание на то, что эти противоречия легко разрешаются, если предположить, что «новые» лучи — не γ-лучи, а нейтральные незаряженные частицы с массой, примерно равной массе протона. Такими части-

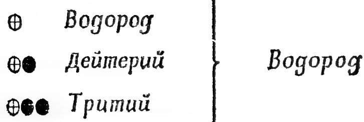


Фиг. 133. Получение нейтронов.

цами могут быть не нейтральные атомы (положительные ядра со всеми их электронами), а, если можно так выразиться, «нейтральные ядра». Такие *нейтроны*, не создававшие вокруг себя электрического поля, не могли бы создавать ионы и испытывать заметное электрическое отталкивание ядрами; они легко проходили бы через вещество, не теряя своей энергии и не оставляя трека в камере. Если бы нейтрон сталкивался с тяжелым ядром в редком «лобовом» соударении, то он упруго отскакивал бы от него без существенной потери энергии. Но если бы он сталкивался с легким ядром, скажем, лучше всего с протоном, то он выбивал бы это ядро, отдав ему значительную часть своей энергии. Нейтроны упруго отскакивают от свинца, но выбивают протоны.

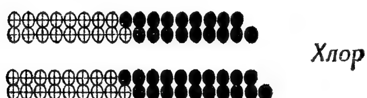
Вскоре на основании измерений импульса нейтрона до и после столкновения была рассчитана его масса. Она оказалась равной 1,0089 в отличие от 1,0076 — массы протона. Нейтрон начали широко использовать в качестве бомбардирующей частицы, и скоро он стал играть важную роль в исследованиях атомов. Когда нейтроны попадают в мишень, то они не испытывают отталкивания со стороны ядер мишени, а проходят мимо них без отклонения, даже если и подходят совсем близко к этим ядрам. Время от времени один из них попадает в ядро мишени и исчезает там, оказываясь запертым в нем таинственными ядерными силами. При этом возникает новое ядро. Добавление нейтрона не меняет заряда ядра. Поэтому новое ядро является изотопом старого, тяжелее его на единицу массы. Оно может оказаться ядром неизвестного изотопа, часто к тому же нестабильного. Тогда это открывает легкий путь получения новых радиоактивных атомов. В настоящее время, бомбардируя ядра нейтронами, можно получать изотопы практически любого элемента, какого только пожелаем.

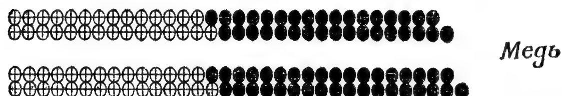
Вначале источником нейтронов служила смесь радия с бериллием. Затем нейтроны стали получать, выбивая их на циклотронах из разных ядер протонами. Такие нейтроны хорошо послужили. В настоящее время в мощных ядерных реакторах получают много разных нейтронов: и быстрых, и со средними скоростями, и медленных. Облучение нейтронами теперь легко производится путем помещения образца внутрь реактора. Например, радиоактивный фосфор, P^{32} был получен в реакторе облучением нейтронами обычного фосфора P^{31}.



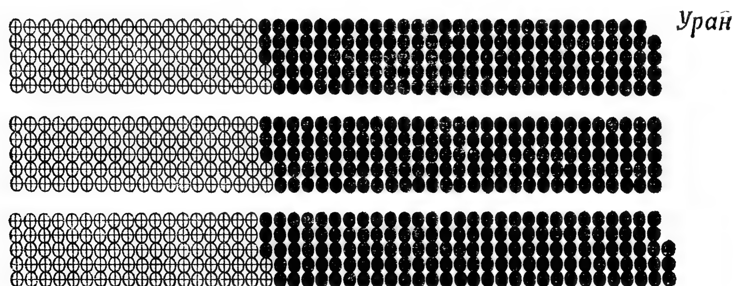












Фиг. 134. Составные части ядра.

Состав ядра

Вернемся теперь снова к структуре ядра. Модель ядра с нейтронами, входящими в его состав, представлялась более удовлетворительной: протоны и нейтроны в каждом ядре и никаких электронов. Атомный номер Z дает число протонов, а остальная часть «массы ядра» («атомный вес» минус Z) — число нейтронов. Ядро гелия (α-частица), например, с зарядом $+2e$ и массой 4 больше не представлялось неустойчивым образованием из четырех протонов и двух электронов, обеспечивающих правильное значение заряда ядра. Теперь оно представляется тесным комочком из двух протонов и двух нейтронов. Правда, для того чтобы понять, что́ их удерживает вместе, необходимо было допустить существование особых сил, однако такой союз казался вполне возможным, тем более что он обеспечивал сохранение спинового момента количества движения. Таким образом, теперь каждое ядро представляется состоящим из протонов, число которых определяет заряд ядра и часть его массы, и связанных с ними нейтронов, число которых обеспечивает остальную часть массы ядра. У легких элементов число нейтронов и протонов примерно одинаково, у тяжелых же избыток нейтронов может достигать 50%. (См пример на приведенной выше диаграмме.)

Такая картина строения ядра подтверждается экспериментами, выполненными на больших ускорителях с очень быстрыми протонами. Попадая в атом мишени, протон с большой частотой выбивает из него нейтрон и примерно столь же часто другой протон (Пустите-ка бильярдный шар по столу, заставленному редко расположенными белыми и черными шарами, число которых одинаково. Такой шар может прокатиться без столкновений. Но если уж он сталкивается, то это происходит равновероятно с белыми и черными шарами.) Это, казалось бы, говорит о том, что нейтроны и протоны действительно являются непременными составными частями ядра. Как они устроены и как они взаимодействуют внутри ядра — на эти вопросы пока нельзя дать окончательный ответ. Другими словами, пока еще не найдена полностью удовлетворительная «модель» ядра, хотя несколько претендующих на то моделей обещают ею быть. Полное описание ядерных сил пока еще отсутствует.

Положительные электроны, «позитроны»

На полученном в 1932 г. удивительном фотоснимке в камере Вильсона ясно видно, что существуют положительные электроны.

Карл Андерсон фотографировал треки частиц высокой энергии, приходящих из космического пространства (прямо на нас). Этот всепроникающий поток космических лучей доходит до нас в виде смеси протонов, электронов, нейтронов и других частиц, заряженных и незаряженных. Первичными частицами являются протоны и другие атомные ядра с энергиями в миллионы или даже в миллиарды *Мэв*. Многие из них проходят невредимо через нашу атмосферу, часть же тормозится в беспорядочных столкновениях, производя «вторичное космическое излучение»: γ-кванты, ливни электронов, протонов, нейтронов и мезонов. Магнитное поле Земли настолько сильно закручивает траектории заряженных частиц, что на экваторе частицы с низкой энергией не могут достигнуть поверхности Земли. Чтобы измерить импульсы этих частиц с помощью камеры Вильсона, физики, исследуя смесь первичных и вторичных частиц, используют сильное магнитное поле. Стенки из тяжелого металла задерживают частицы локального происхождения, они не задерживают космические лучи высоких энергий, и те проходят через камеру. Для того чтобы происходило расширение камеры, когда частица проходит в выбранном направлении, систему счетчиков Гейгера можно расположить по схеме «следящего телескопа». Электроны очень высокой энергии легко проходят через камеру, стенки и т. д., оставляя треки из водяных капель, сконденсировавшихся на ионах внутри камеры, которые можно сфотографировать Ионы, созданные столь быстрой частицей, довольно редко разбросаны на ее пути. Поэтому оставленный ею трек выглядит «тонким», но тем не менее его легко можно сфотографировать. Андерсон сфотографировал трек, который был похож на трек быстрого электрона (импульс частицы определялся по отклонению в магнитном поле, пронизывающем камеру. При этом длина трека исключала возможность принять его за трек более тяжелой частицы, такой, как протон). Андерсон решил, что он обнаружил *положительный* электрон.

Задача 2. Доказательства того, что существует положительный электрон (см. фотографию Андерсона, фиг. 123)

а) Если Андерсон определил по форме, что это трек электрона, что нашел бы он, измерив кривизну *трека в разных точках?*

б) Если трек был закручен в сторону, противоположную большинству треков на подобных фотоснимках, то он был оставлен либо положительным электроном, подобным отрицательному, либо отрицательным электроном, который имел...?

в) Чтобы решить, какое из двух предположений в пункте б) правильно, Андерсон перегородил камеру металлической пластинкой, надеясь сфотографировать трек, который пронижет пластинку. См. его удачный фотоснимок. На основании чего по этому фотоснимку можно утверждать, что трек принадлежит положительному электрону?

Положительные электроны, называемые теперь *позитронами*, были предсказаны за несколько лет до этого П. А. М. Дираком на основе умозрительной теории. Так что, когда Андерсон сделал свое открытие, теория готова была его объяснить. В целях математической завершенности и симметрии развиваемой им теории Дирак предположил, что существует целое море электронов с *отрицательной кинетической энергией*, если хотите, нереальных и, следовательно, не наблюдаемых. Однако если одному из таких эфемерных электронов с «отрицательной энергией» $^-(e^-)$ передать энергию ($2mc^2$), достаточную для того, чтобы его энергия стала положительной, возникает обычный электрон e^- и «дырка» в океане мифических $^-(e^-)$ электронов. Эта «дырка» затем будет вести себя как реальный положительный электрон. Таким образом, теория предсказывала положительный электрон как нечто вроде зеркального отображения обычного электрона. В терминах «античастиц» позитрон отвечает «антиэлектрону».

Поскольку удалось обнаружить в камере Вильсона реальный e^+-электрон, то начали искать, а затем и обнаружили ранее предсказанное событие рождения «из ничего» пары e^+ и e^-. γ-лучи высокой энергии, падая на атом, способны затратить свою энергию на создание пары электронов e^- и e^+. Это не что иное, как создание излучением вещества — материальных частиц (фиг. 156).

Задача 3. Энергия, необходимая для создания пары

Масса покоя электрона и позитрона одинакова и равна 1/1840 массы протона (масса протона соответствует энергии 940 Мэв).

а) Какой энергией (наименьшей) должен обладать γ-луч, чтобы быть способным родить пару e^- и e^+?

б) Какой кинетической энергией (в эв) должен обладать электрон, чтобы его полная масса в неподвижной системе координат была вдвое больше его массы покоя?

в) Насколько тяжелее казался бы β-луч с кинетической энергией 2 Мэв по сравнению с электроном, движущимся с малой скоростью?

г) Какую энергию (в эв) должен иметь γ-луч для создания пары e^- и e^+, и выбрасывания каждой частицы с кинетической энергией 2 Мэв?

Фактически γ-луч с такой энергией создал бы в камере Вильсона неподвижную пару. γ-луч с большей энергией (более крупный

квант, с более короткой длиной волны) способен превратить избыток энергии в кинетическую энергию пары и толкнуть электрон и позитрон вперед. Тогда в камере Вильсона с магнитным полем такая пара будет видна как буква V (фиг. 124). Массивное атомное ядро служит γ-лучу как бы наковальней, на которой он выковывает пару — процесс идет при условии выполнения закона сохранения энергии и импульса. В камере Вильсона рождение пар происходит вблизи ядер атомов газа или ядер металлической пластинки, помещенной в камеру для того, чтобы сделать этот процесс более вероятным.

Когда было найдено, что многие искусственно созданные радиоактивные атомы излучают позитроны e^+ (или β^+), последние стали привычным явлением. Обычный атом, в ядро которого на циклотроне влетел лишний протон, часто оказывается нестабильным. Для своих размеров новое ядро чувствует себя пересыщенным протонами (или, что то же самое, обедненным нейтронами). Поэтому с большой вероятностью могут произойти следующие превращения:

[A] один из протонов $\rightarrow$ нейтрон и электрон, причем электрон должен унести с собой положительный заряд, т. е. это должен быть β^+ в силу универсального закона сохранения заряда [1]. Ядро другого радиоактивного атома может оказаться переобогащенным нейтронами, и тогда в нестабильном ядре:

[B] нейтрон $\rightarrow$ протон $+$ электрон, причем электрон уносит с собой отрицательный заряд, т. е. излучается β^- [2].

Следовательно, утверждать, что нейтрон «состоит» из тесно связанных протона и электрона, по-видимому, нельзя. Правильнее говорить в более общем смысле (см. фиг. 135).

Упомянутые выше превращения [A] и [B] — это лишь тени более сложных событий, которые разыгрываются среди частиц

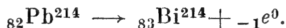
---

[1] *Пример*: Cu^{62}, полученная на циклотроне выбиванием нейтрона из обычной Cu^{63} быстрым протоном



$$_{29}Cu^{62} \longrightarrow {}_{28}Ni^{62} + {}_{+1}e^{0}.$$

[2] *Пример*: Радий В (изотоп свинца) излучает β-лучи и становится изотопом висмута



$$_{82}Pb^{214} \longrightarrow {}_{83}Bi^{214} + {}_{-1}e^{0}.$$

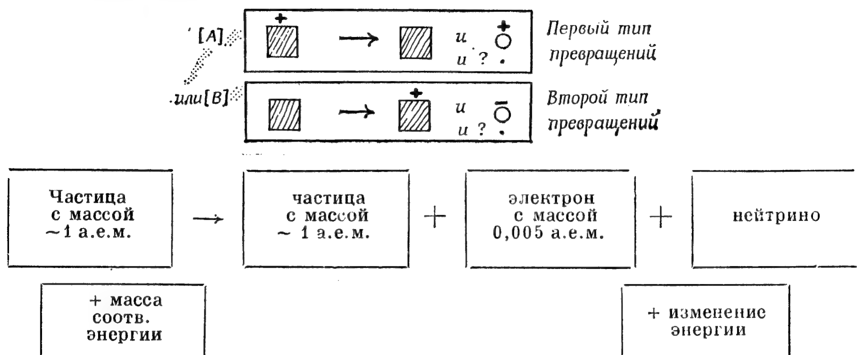
Обычный фосфор P^{31}, приобретая дополнительный нейтрон из числа нейтронов внутри ядерного реактора, может стать радиоактивным P^{32}, который излучает β^-:



$$_{15}P^{32} \longrightarrow {}_{16}S^{32} + {}_{-1}e^{0}$$

с периодом полураспада 14 дней.

и зарядов. Превращение типа [*B*] происходит спонтанно для свободных нейтронов: нейтроны радиоактивно распадаются на протон, электрон ($_1H^+$ и e^-), и нейтрино с периодом полураспада, примерно равным 12 минутам. Превращение [*A*] не может происходить без затраты дополнительной энергии. В таком превращении, теперь это достоверно известно, также участвует нейтрино. Во *всех* превращениях выполняются два правила:



Фиг. 135.

1. Сохраняется заряд: если возникают новые заряды, то при этом число положительных и отрицательных зарядов одинаково.
2. Сохраняется число частиц при условии, что частицы и им соответствующие античастицы (например, e^- и e^+) считаются «одинаковыми, но противоположного знака» и вычеркиваются при подсчете [1].

Общий вывод таков: «старое представление о том, что частица представляет собой связку других частиц, следует оставить и использовать для ядерных превращений установленные новые правила». На молекулы в химии распространяется старая идея кулинарного рецепта для приготовления торта: например, можно говорить, что молекула воды *состоит* из двух атомов Н и одного О.

[1] Необходимо, по-видимому, чтобы выполнялось следующее правило: сохраняются по отдельности числа тяжелых (протоны и т. д.) и легких (электроны и т. д.) частиц. Столкновение с частицей сверхвысокой энергии может настолько встряхнуть ядро, что оно буквально брызнет во все стороны тяжелыми и легкими частицами. Число тяжелых частиц при этом сохраняется; никогда не наблюдалось, чтобы хотя бы одна из них полностью распалась на легкие частицы.

Однако если распространить его дальше на субатомный уровень и говорить, что «нейтрон *состоит* из протона и электрона», то при этом можно ввести себя в заблуждение. Здесь кулинарная аналогия заведет нас слишком далеко. К подобным утверждениям следует относиться с осторожностью, как относятся к утверждению ребенка, вытащившего червяка из яблока и сказавшего: «Из яблока получился червяк!»

Приведем еще некоторые экспериментальные данные относительно структуры нейтрона:

1) Масса нейтрона на 0,001 а. е. м. больше массы протона. Если учесть связанный с массой дополнительный запас энергии 1 *Мэв*, выделение энергии в превращении нейтрон $\rightarrow$ протон не является неожиданным. Однако такое превращение нельзя представить как простое раскалывание на куски нестабильного образования, потому что
2) хотя свободный нейтрон и нестабилен, в атомных ядрах он живет бесконечно долго,
3) хотя у нейтрона нет заряда, вокруг него существует магнитное поле, что, по-видимому, указывает на движение внутри него каких-то зарядов,
4) результаты обстрела нейтронов (в связанном состоянии в атомных ядрах) электронами как будто свидетельствуют о том, что магнитное поле существует и внутри нейтрона, однако в нем нет и намека на какие-либо заряды.

Существует предположение, что нейтрон обладает внутренней структурой, возможно, представляет собой протон с вращающимся вокруг него отрицательным мезоном. Однако такое предположение выглядит рискованным, поскольку, если его понимать буквально, оно находится в противоречии с некоторыми экспериментальными фактами.

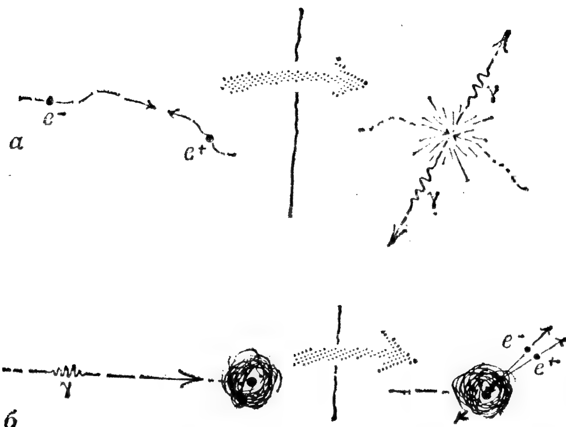
Аннигиляция вещества

Может также происходить событие, противоположное рождению пар. Позитрон встречается с обычным отрицательным электроном, и они исчезают, рождая γ-лучи:

$$e^{+} + e^{-} \longrightarrow \gamma + \gamma.$$

Для того чтобы выполнялся закон сохранения энергии и импульса, в результате реакции должно возникать *два* γ-луча, движущихся в противоположных направлениях. Они и наблюда-

ются, если радиоактивный образец, излучающий β^+, поместить между двумя цилиндрическими счетчиками. Счетчики тогда регистрируют *одновременно* пару γ-лучей как раз той энергии, которую следовало бы ожидать, — 0,5 *Мэв* каждый. Их энергию можно



Фиг. 136. а — аннигиляция; б — образование пар.

измерить по числу ионов, которые создаются в ионизационной камере γ-лучами при выбивании электронов.

Задача 4. Аннигиляция электронов

Покажите, что, если при превращении пары электронов в пару γ-лучей не происходит потери массы, каждый γ-луч обладает энергией, равной 0,5 Мэв.

Лирическое отступление

Таким образом, соотношение $E=mc^2$ выполняется не только для быстрых частиц, но применимо также и к рождению и аннигиляции вещества. Критикам, отрицавшим это, говоря, что «электроны — не обычное вещество», пришлось ждать с 1930 по 1955 г., чтобы увидеть рождение ядер водорода — протонов и антипротонов. Сегодня на самых больших ускорителях можно получать частицы с энергией в несколько миллиардов электронвольт, которые способны создавать такие пары за счет своей кинетической энергии.

Теперь известны целые серии таких «зеркальных» пар: электроны и позитроны, протоны и антипротоны, нейтроны и анти-

нейтроны. Частицы последней пары не обладают зарядами противоположного знака, так как у них вообще нет заряда, но они отличаются по своим магнитным и спиновым свойствам. Встречаясь друг с другом, частицы и античастицы немедленно аннигилируют. Некоторые ученые усмехаются над выдумками фантастов, когда они рисуют «антиматерию» и «антимиры», однако не следовало бы. Ведь предсказание Дирака о существовании положительных электронов вначале тоже казалось абсурдным.

Новые радиоактивные ядра

В наше время радиоактивные ядра с искусственной радиоактивностью легко получатся путем введения в них дополнительных нейтронов. При этом заряд ядра не меняется (*тот же самый* элемент, *те же самые* химические свойства), но обладает *слишком большой* массой, *слишком большим* числом нейтронов при данном числе протонов. Такая теснота чревата превращениями: переходом одного из нейтронов в ядре в протон. Это происходит при распаде нестабильного ядра. Причем рождаются «+» и «—» заряды; «—» заряд улетает из ядра в виде маленькой частицы: рождается электрон и уносится в виде β-луча. (Одновременно должно также испускаться невидимое нейтрино.)

Период времени с 1930 по 1940 г. был ознаменован богатым потоком ядерно-физических данных. Можно было похвастаться: квадратные клетки периодической системы элементов, отвечавшие каждому элементу, разрослись в целый ряд ячеек, в которых поселились различные изотопы, стабильные и нестабильные, все — атомы одного и того же элемента, но с разной массой. Для каждого нестабильного изотопа добывалась новая информация: период его полураспада, частицы, которые он излучает, энергия, выделяющаяся при его распаде.

На фиг. 138 приведена схема одного из опытов по облучению. Протоны с энергией 20 *Мэв* бомбардируют мишень из меди. В результате множества столкновений они останавливаются в ней, пройдя путь в 1 *мм*, причем почти каждый раз их кинетическая энергия переходит в тепло. Однако малая часть их, проходя вблизи ядра атома меди, попадает в область действия мощных ядерных сил и захватывается ядром. Иногда вслед за этим вместо протона вылетает нейтрон. Оставшееся же ядро оказывается радиоактивным ядром *цинка*. В иных случаях протон выбивает из ядра

100

Атомный номер

Z

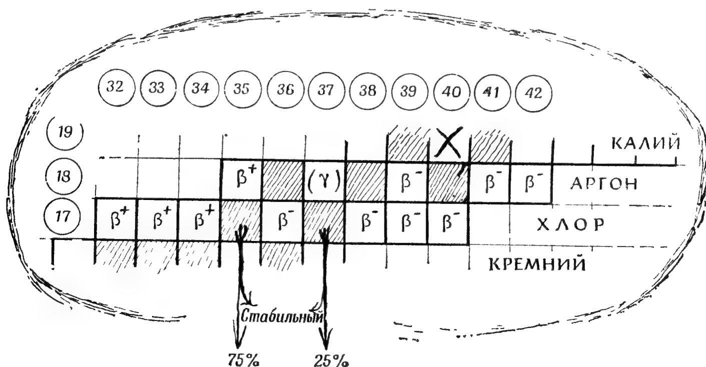
(заряд ядра)

50

0 50 100

Массовое

Число протонов + число нейтронов



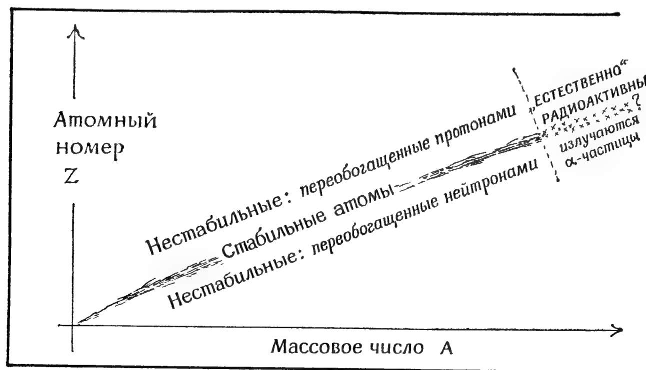
Фиг. 137. Таблицы

Сплошные черные квадратики изображают стабильные изотопы. Светлые квадратики — и т. п. Крестиками помечены «естественные» радиоактивные изотопы, встречающиеся активный изотоп, отвечают самым

150 200 250

число A

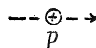
в ядре = атомный вес, округляемый до ближайшего целого числа

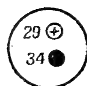


изотопов.

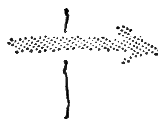
«искусственные» нестабильные радиоактивные изотопы, создаваемые при облучении; в природе. (Большинство из них, за исключением обычного калия, имеющего один радио-большим атомным номерам.)

На циклотроне



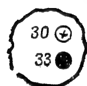


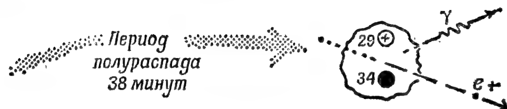


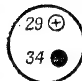




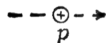
Быстрый протон падает на стабильное ядро меди, ... входит в него, . . . испускается нейтрон, остается нестабильное ядро цинка

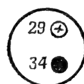






Нестабильное ядро цинка излучает положительный электрон и гамма-квант и становится стабильным ядром меди, точно таким же, какое бомбардировалось





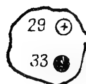




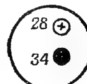




Протон входит в ядро меди, излучаются нейтрон и протон, остается нестабильное ядро меди

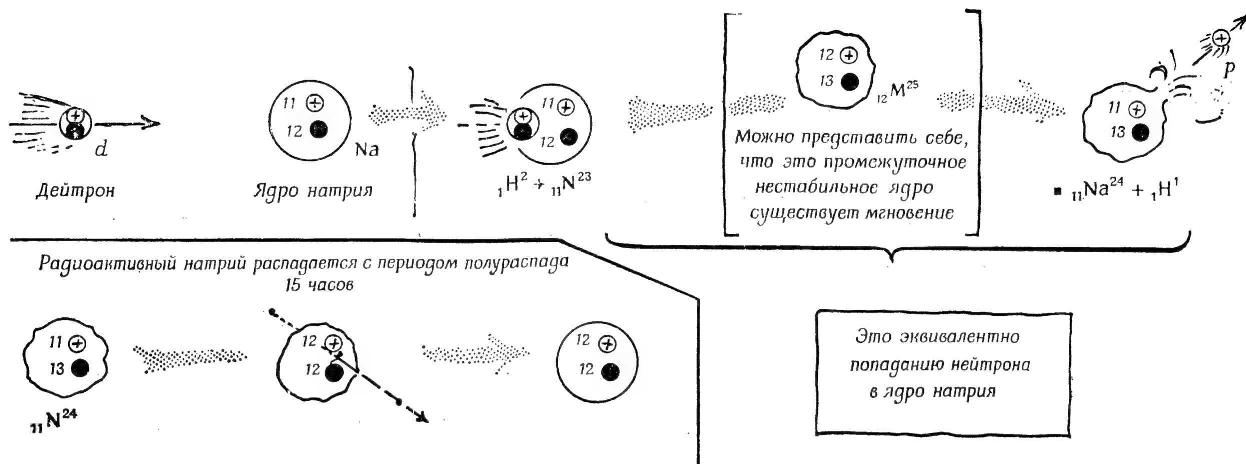






Нестабильное ядро меди излучает положительный электрон и гамма-квант и становится стабильным ядром никеля

Фиг. 138. Ядерные превращения при бомбардировке меди на циклотроне.



Фиг. 139. Получение радиоактивного натрия бомбардировкой дейтронами на циклотроне.

Ядра тяжелого водорода (дейтерия) ускоряют на циклотроне и направляют на мишень из естественного натрия. Дейтрон, попадая в ядра мишени, выбивает из них протоны.

и протон, и нейтрон одновременно. Тогда получается ядро *меди*, но аномально легкое (Cu^{62}) и радиоактивное.

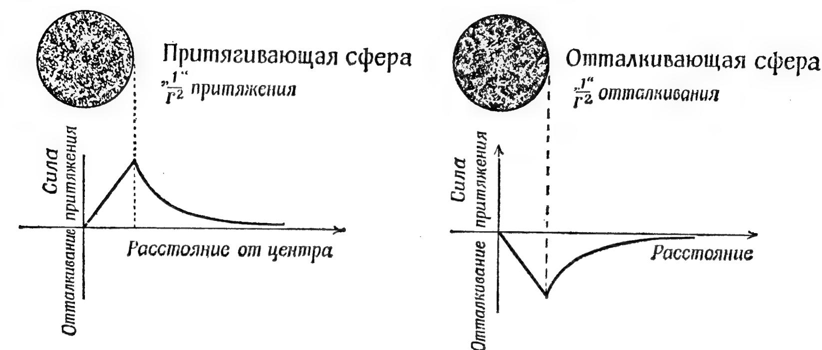
Другой пример приведен на фиг. 139. В циклотрон вводят тяжелый водород, его ядра (дейтроны) ускоряют, а затем используют для бомбардировки мишени из естественного натрия. Дейтрон попадает в ядра атомов мишени и выбивает из них протон (что эквивалентно попаданию нейтрона в ядро натрия). При этом получается радиоактивный атом натрия с периодом полураспада, около 15 часов. Атом излучает β-лучи (и γ-лучи, уносящие некоторый избыток энергии), превращаясь в стабильный атом магния.

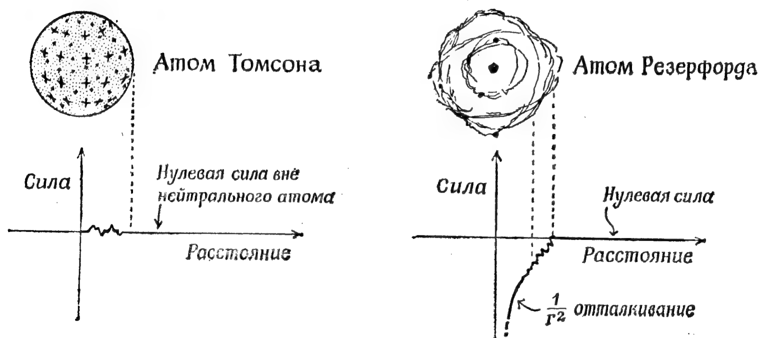
Радиоактивный натрий широко используется в научных исследованиях. В ничтожном количестве его добавляют к обычному натрию, затем получают соль и в таком виде прослеживают его путь через растения и животных. Можно также исследовать обмен атомами натрия между солью в кристаллическом состоянии и насыщенным ее раствором. Или же можно изучать, как замещает натрий другие атомы в органических молекулах. Присутствие радиоактивного натрия можно обнаружить счетчиком Гейгера, регистрируя β-лучи, сигнализирующие о распаде атомов натрия. Хорошим счетчиком можно обнаружить 0,00 000 000 000 000 000 001 *кг*, т. е. 10^{-20} *кг* радиоактивного натрия на естественном радиоактивном фоне.

Ядерные силы

Из экспериментов по рассеянию альфа-частиц (а также протонов и других частиц на ускорителях) было найдено, что в широком интервале расстояний сила, с которой действует какое-либо ядро мишени, есть обратно пропорциональная квадрату расстояния электрическая сила. Вне атома создаваемая зарядом ядра электрическая сила практически полностью экранирована электронным облаком этого атома. В то же время и внутри этого облака внешних электронов падающая на ядро заряженная частица испытывает действие только обратно пропорциональной квадрату расстояния электрической силы, описываемой законом Кулона. В атомах легких мишеней, радиус которых порядка 1Å во всей области расстояний, начиная с внешних частей электронного облака, т. е. с расстояний порядка 0,1 Å вплоть до расстояний, в тысячи раз меньших, порядка 0,00001 Å, единственное действующее поле — это поле силы Кулона. В электронном облаке это поле несколько слабее, так как электроны действуют с силой противо-

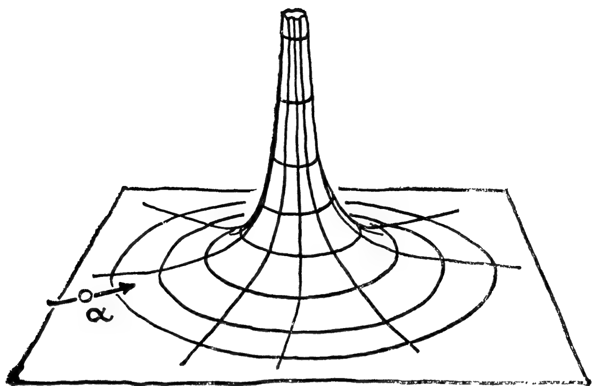
положного знака по сравнению с ядром, но это также поле кулоновских сил. Так что весь атом, начиная с расстояний от ядра порядка 1/10 000 Å вплоть до его внешних областей, ~1 Å, окружен кулоновскими полями. В тяжелых ядрах типа золота картина та же самая, только многоэлектронное облако простирается еще ближе к ядру.



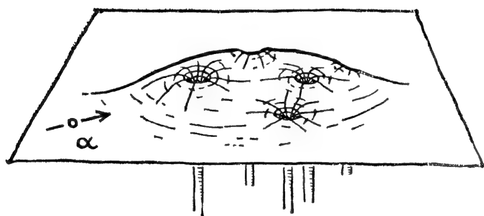


Фиг. 140. Атомные силы.

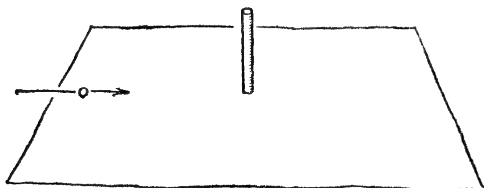
Возвращаясь к модели холмов силовых полей, изложенной в гл. 8, модель атома Резерфорда можно изобразить в виде равномерно заостряющейся кверху колонны так, как это сделано на фиг. 141 (при этом модель атома Томсона изображалась бы в виде пологого бугра, покрытого неглубокими хаотически разбросанными воронками, занятыми электронами, фиг. 142). Представим



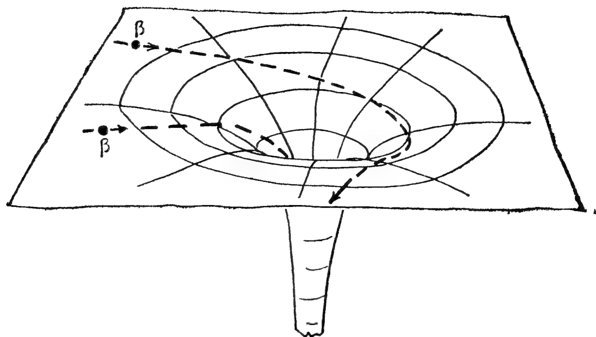
Фиг. 141. Диаграмма энергетического холма. Закон квадрата обратного расстояния.
Отталкивание в атоме Резерфорда.



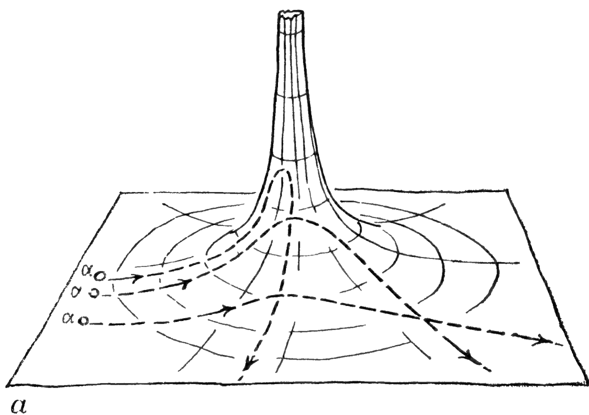
Фиг. 142. Диаграмма энергетического холма. Атом Томсона.

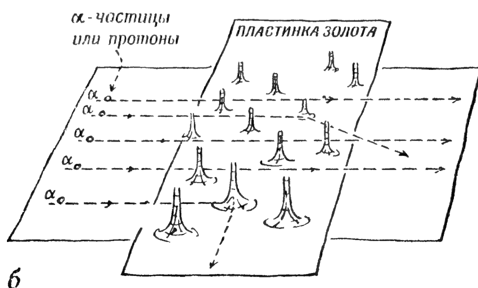


Фиг. 143. Диаграмма энергетического холма. Твердая, непроницаемая сердцевина малого радиуса в качестве мишени.



Фиг. 144. Диаграмма энергетического холма. Сила притяжения.



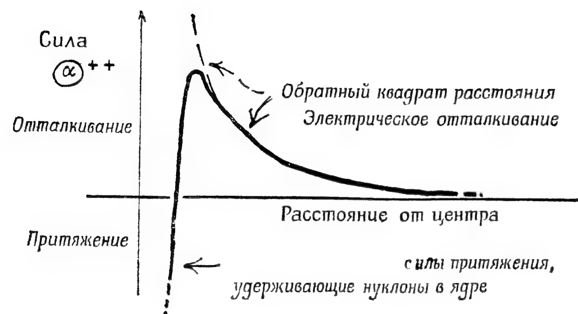


Фиг. 145. Рассеяние α-частиц или протонов.

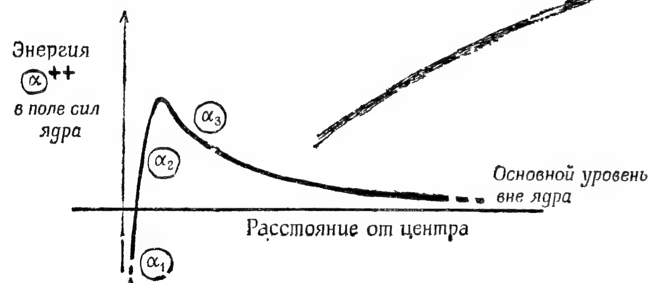
себе, что сила Кулона отсутствует, а ядро ведет себя как твердый шар, сильно отталкивающий при «контакте» (жаргонный термин, означающий «при сближении на очень малое расстояние в атомном масштабе»). Тогда модель энергетического холма представлялась бы в виде плоской равнины с резко возвышающейся над ней узкой колонной, изображающей «контакт» (фиг. 143). Поле интенсивных сил притяжения изображалось бы в виде ямы с крутыми стенками (фиг. 144).

Представим себе, что в нескольких таких моделях, каждая из которых изготовлена со многими силовыми колоннами или ямами, представляющими большое число атомов в рассеивающей мишени, в разных направлениях пускаются маленькие шарики. Тогда в моделях с разной формой колонн пущенные снаряды будут рассеиваться в разных направлениях по-разному. В модели силы Кулона часть шариков будет рассеиваться на прямые углы (фиг. 145) и очень немногие из них — назад. По сравнению с ней модель узких колонн будет рассеивать гораздо меньше и точно так же, как и вывернутая по отношению к ней наизнанку модель ям с крутыми стенками, поскольку почти все снаряды будут проходить без отклонения. Если рассуждать в противоположном направлении, то окажется, что можно выбирать модели, используя экспериментальные данные по рассеянию. Бомбардировка протонами или другими частицами на все более крупных ускорителях дает возможность изучать рассеяние на все более близких к ядру расстояниях. Тогда обнаруживается, что модель холма для силы Кулона, хорошо оправданная в применении к рассеянию медленных α-частиц, имеет свои пределы применимости. Эксперименты по рассеянию показывают, что при максимальном приближении к ядру положительный снаряд испытывает меньшую по величине силу, чем та, которая должна быть согласно закону Кулона. Частицы, которые отскакивают назад при рассеянии, являются как раз частицами, приближающимися к ядру на максимально близкое расстояние. Их оказалось гораздо меньше, чем ожидалось.

На расстояниях порядка 0,00001 Å (10^{-15} *м*, или, как называют теперь физики-ядерщики, 1 *ферми*) начинают заметно проявлять себя новые силы. На этих расстояниях должны действовать силы притяжения очень малого радиуса действия, благодаря которым на вершине холма энергетический уровень делает перегиб, а затем погружается в яму. Такая впадина в центре представляет собой ядерную яму — жилище обитателей ядра, проживающих, по-видимому, в очень стесненных условиях. Обитателей стабильных ядер можно рисовать себе находящимися в яме на большой



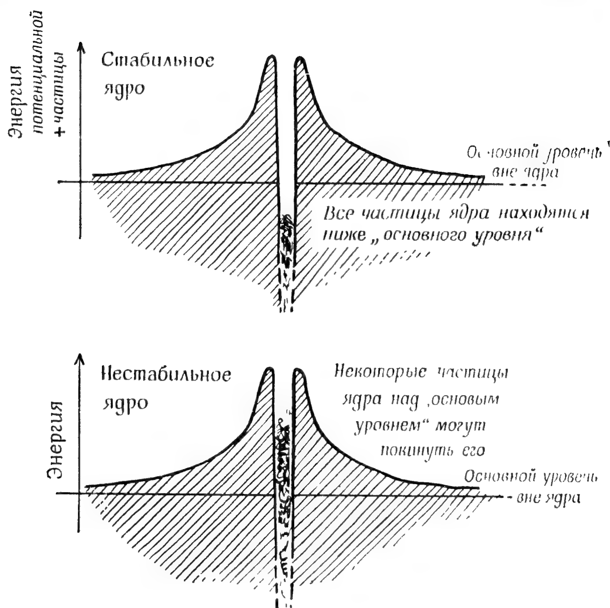




Фиг. 146. Ядерные силы и ядерная энергия.

α_1 — α-частица в ядре с энергией ниже «основного» уровня будет оставаться все время в нем — ядро стабильно, α_2—α-частица с такой энергией может вылетать из ядра; α_3 — подобная α-частица пребывает вне ядра.

глубине, причем без какой-либо надежды выбраться из нее. В радиоактивных ядрах они занимают уровни, не слишком удаленные от края ямы: во всяком случае, эти уровни выше основного, так что у них есть шансы вырваться из нее. Отметим тот факт, что и холм, и яма не являются материальными категориями — каким-то



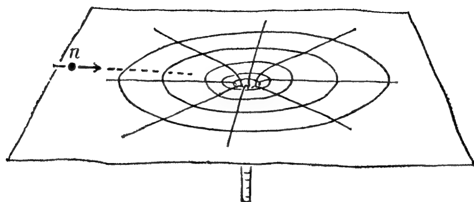
Фиг. 147. Модели ядерных энергетических холмов.

подобием кофейной чашки,— а представляют собой лишь образы на энергетической диаграмме. Тем не менее они позволяют уяснить, как и почему составные части ядра находятся внутри ядра.

Бомбардировка нейтронами

Иная картина возникает, если в качестве исследовательских снарядов использовать не α-частицы и протоны, а нейтроны. В силу того, что у нейтрона нет заряда и, следовательно, электрического поля вокруг него, он, проходя мимо атома, не срывает его электроны. Не испытывает он отклонения и в поле кулоновских сил ядра. В большинстве случаев нейтрон движется, не испытывая

отклонения ни возле атома, ни внутри атома, ни в непосредственной близости к ядру. Если нейтрон использовать как метательный снаряд, то в «модели холмов» атом для него представляется в виде энергетической плоской равнины. Однако нейтроны могут испытывать столкновения, если случается, что они проходят на очень близком расстоянии от ядра мишени. Тогда они рассеиваются, отклоняясь в сторону, или захватываются ядром и задерживаются в нем. Это показывает, что нейтроны испытывают действие



Фиг. 148. Диаграмма энергетического холма в случае нейтрона, приближающегося к ядру.

ядерных сил [1], причем это силы очень короткого радиуса действия. Эти короткодействующие силы вполне могут оказаться теми же самыми силами, действие которых испытывают заряженные частицы. На тех расстояниях от ядра, где ядерные силы начинают прогибать вершину кулонова холма, на плоской равнине для нейтронов зияет глубокий колодец [2].

Думается, что при уменьшении жилой площади, приходящейся на каждого обитателя и так перенаселенного ядра, ядерные силы из сил притяжения переходят в силы отталкивания. Ядерное «племя» не должно ни слипаться в комок, ни разлетаться во все стороны.

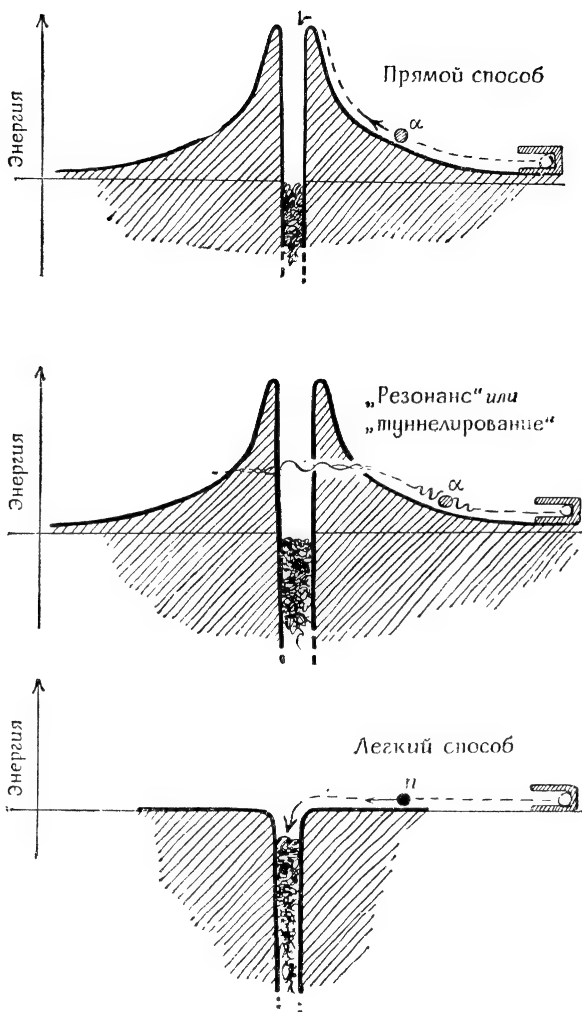
Бомбардировка нейтронами. Упругие соударения

В большинстве случаев, если только мишень не состоит из легких ядер и столкновение не лобовое, нейтрон, проходя недалеко от ядра мишени, сталкивается с ним упруго, отдавая ему лишь

---

[1] Вероятно, отчасти это электрические силы вследствие внутренней электрической структуры нейтрона.

[2] Тот факт, что вместо возвышающегося холма имеет место яма, еще не означает, что рассеяние назад невозможно. Снаряд может облететь вокруг горлышка потенциальной ямы подобно комете, облетающей Солнце.



Фиг. 149. Бомбардировка ядер.

малую часть своей кинетической энергии. При упругом столкновении с тяжелым ядром мишени, таким, как ядро свинца, даже в лобовом столкновении нейтрон теряет менее 2% своей кинетической энергии; радиус действия ядерных сил настолько мал, что лобовые или близкие к ним соударения очень редки. Однако в силу того, что атомов много, поскольку даже кусочек вещества, который нам кажется крошечным, содержит их громадное число, нейтрон, проходя через мишень, быстро замедляется благодаря упругим столкновениям. Быстрый нейтрон (т. е. нейтрон с кинетической энергией ~1 *Мэв*, образующийся при делении U^{235}) будет двигаться сквозь окружающий материал сначала с большой скоростью, затем со средней, а потом с малой скоростью до тех пор, пока он в столкновениях не замедлится до «тепловой» энергии (т. е. когда его кинетическая энергия сравняется с энергией молекул газа при температуре материала). Это приводит к тому, что полный пробег быстрого нейтрона в большинстве твердых тел составляет несколько сантиметров по сравнению с пробегом протонов или альфа-частиц с той же первоначальной энергией, равным нескольким тысячным долям сантиметра.

Бомбардировка нейтронами. Захват

Иногда при соударении на очень близких расстояниях нейтрон захватывается ядром мишени. Частота этих событий, по-видимому, сильно колеблется от одного элемента к другому и различна даже для изотопов одного и того же элемента. Вероятность захвата также сильно зависит, причем довольно сложным образом, от скорости нейтрона [1].

---

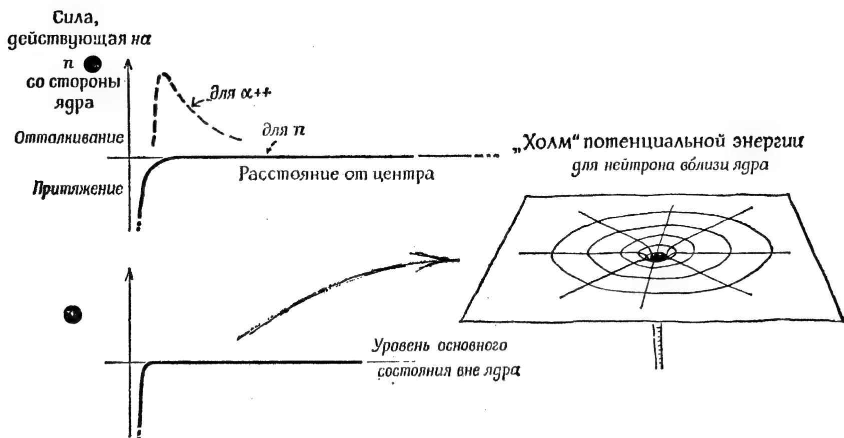
[1] Простой анализ процесса столкновения заряженных частиц, отталкивающих друг друга на достаточно далеких относительных расстояниях, показывает, что

при малых скоростях захват маловероятен, поскольку частицы не могут подойти близко друг к другу на расстояния, где силы притяжения существенны;

при больших скоростях захват маловероятен, поскольку время, в течение которого частицы находятся на близком расстоянии друг от друга, слишком мало, чтобы ядерные силы успели проявить свое действие ($F\Delta t = \Delta(mv)$, и если Δt очень мало, то... .

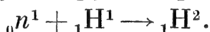
В случае медленных нейтронов запрета на захват не существует, и можно ожидать, что захват возрастает с уменьшением скорости. В действительности поведение имеет более сложный характер: имеются явные признаки того, что захват легче всего происходит при определенных, «избранных» скоростях, что следует интерпретировать как «резонанс», если нейтрон представлять как волну.

Часто новое ядро, образовавшееся после захвата, оказывается нестабильным, радиоактивным. Эксперименты по захвату нейтронов позволяют исследовать не только структуру ядра, но и получать новые нестабильные атомы. Ниже перечислены некоторые из нескольких сотен таких событий, известных в настоящее время.



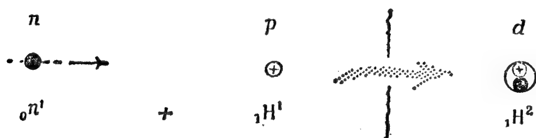
Фиг. 150. Облучение нейтронами.

1) Ядро водорода поглощает нейтрон и становится ядром «тяжелого водорода» (дейтерий), которое представляет собой сильно связанные друг с другом протон и нейтрон



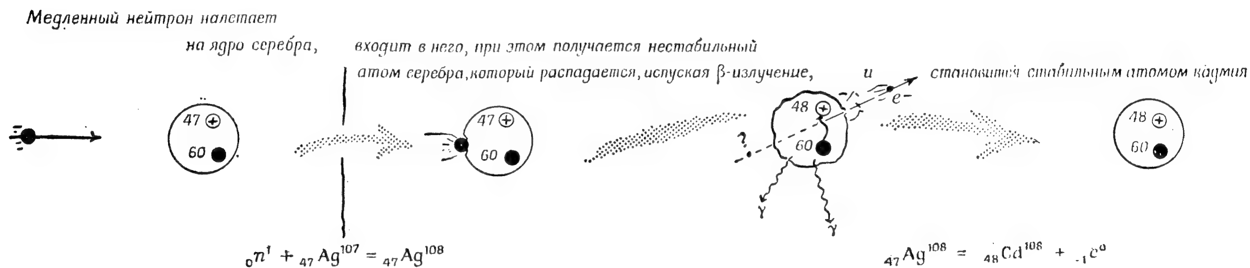
$$ {}_0n^1 + {}_1\mathrm{H}^1 \longrightarrow {}_1\mathrm{H}^2. $$

2) Ядро серебра может поглотить нейтрон и стать радиоактивным. Особенно часто это случается для *медленных* нейтронов.



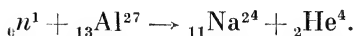
Фиг. 151. Получение дейтерия.

Это легко демонстрируется: стоит лишь замедлить быстрые нейтроны с помощью бака с водой, как серебряная монета становится радиоактивной (фиг. 152 и 153).



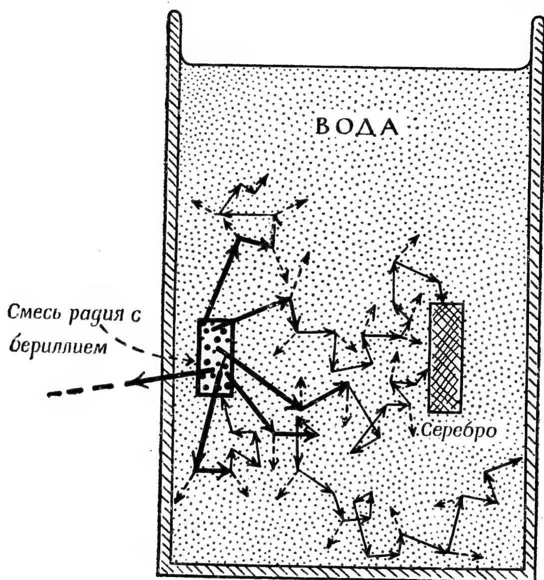
Фиг. 152. Получение радиоактивного серебра путем облучения нейтронами.

3) Ядро алюминия поглощает нейтрон, испустив α-частицу, превратившись в радиоактивный натрий — тот самый полезный изотоп, который получается при облучении натриевой мишени дейтронами:



$$_0n^1 + {}_{13}Al^{27} \longrightarrow {}_{11}Na^{24} + {}_2He^4.$$

4) Ядро бора может поглотить медленный нейтрон и развалиться на ядро лития и α-частицу, разлетающиеся в разные стороны

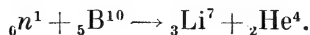


Фиг. 153. Облучение нейтронами.

Источником быстрых нейтронов служит смесь радия и бериллия. Нейтроны, сталкиваясь с ядрами водорода воды, теряют энергию в каждом столкновении, замедляясь до тепловых скоростей в результате примерно десятка столкновений. После этого у них велики шансы при тесном сближении с ядром атома серебра поглотиться им.

Нейтроны, кроме того, сталкиваются с ядрами атомов кислорода, однако при столкновении с ними они теряют гораздо меньшую энергию. Иногда они захватываются ядрами атома водорода, образуя ядра «тяжелого водорода».

с суммарной кинетической энергией 2,8 *Мэв*. (Для регистрации медленных нейтронов в ионизационные камеры впускают газ, содержащий бор.)



$$_0n^1 + {}_5B^{10} \longrightarrow {}_3Li^7 + {}_2He^4.$$

5) Кадмий обладает исключительно большим сечением захвата *медленных* нейтронов, что делает его незаменимым при использовании в качестве поглотителя для управления ядерным реактором.

6) *Радиоактивный углерод и «углеродные часы».* Когда нейтрон попадает в ядро азота, он иногда выбивает из него протон, образуя ядро радиоактивного углерода:



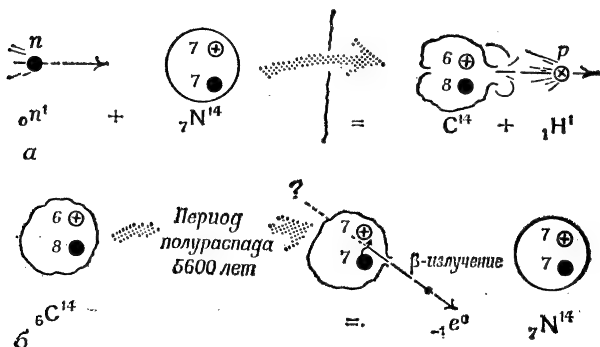
$$_0n^1 + {_7N^{14}} \longrightarrow {_6C^{14}} + {_1H^1}.$$

Радиоактивный углерод C^{14} распадается с периодом полураспада 5600 лет, испуская β-лучи и превращаясь снова в азот:



$$_6C^{14} \longrightarrow {_7N^{14}} + {_{-1}e^0}.$$

Это дает чудесный способ для определения возраста археологических находок. Нашу атмосферу постоянно пронизывает поток нейтронов, входящих в состав приходящих издалека космических лучей или образуемых этими лучами в атмосфере (некоторые из них сталкиваются с атомами азота в воздухе и образуют



Фиг. 154. Радиоактивный углерод.
а — образование: нейтроны бомбардируют азот; *б* — распад.

C^{14}). Эти атомы входят в состав содержащегося в атмосфере углерода (и в течение некоторого времени в океане) в основном в виде соединения CO_2. Как известно, поток космических лучей оставал-

ся постоянным в течение многих столетий и привел к образованию малой, но неизменной доли радиоактивного углерода в мировом содержании CO_2 — той доли, которая установилась в результате баланса между распадом и образованием нового CO_2 в атмосфере. Но так как CO_2 используется деревом для образования древесины (или морскими животными при формировании скелета), то углерод в этом соединении входит в твердый материал, в который не может больше поступать радиоактивный углерод из азота. Радиоактивная часть углерода распадается с периодом полураспада 5600 лет. Следовательно, измеряя содержание радиоактивного углерода в образце (скажем, в морской раковине), можно определить его возраст, т. е. сколько времени прошло с тех пор, когда содержащийся в нем углерод образовался в атмосфере. Для измерения такой β-активности были сконструированы чувствительные счетчики, и теперь можно определять возраст образцов кусочков древесины или одежды, оставшихся нам от древних цивилизаций [1].

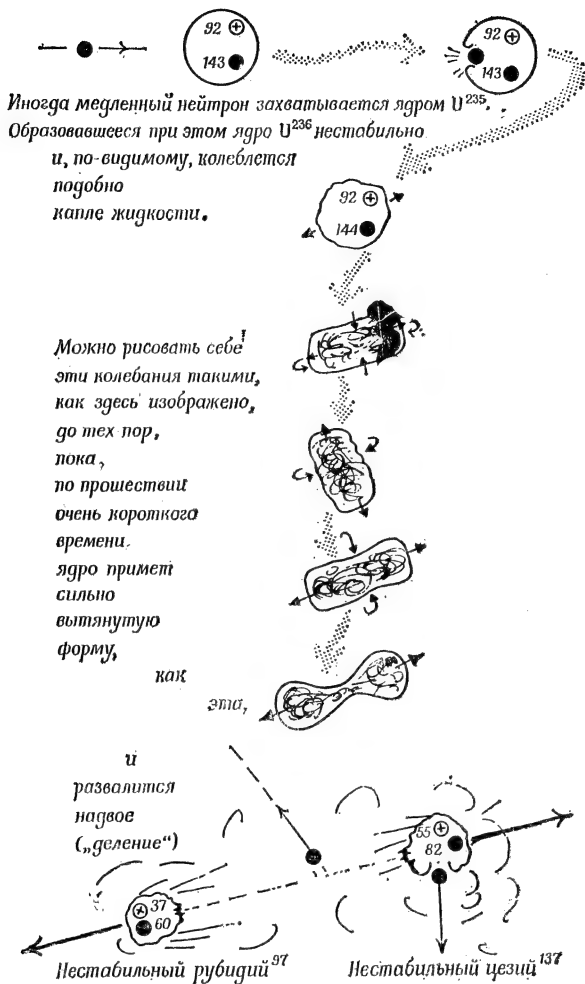
7) *Деление.* Иногда при поглощении нейтрона уран ведет себя странным образом. Обсудим это ниже.

Деление

Двадцать лет тому назад возникло подозрение, что при облучении урана медленными нейтронами образуются новые элементы, стоящие за последним элементом в периодической системе. Было ясно, что в облученном уране возникали и некоторые другие элементы, причем химический анализ показал, что они не были соседними по таблице элементами, такими, как обычные продукты распада при захвате. Было высказано предположение, что при этом создавались новые, еще не известные элементы. Затем химический анализ показал, что эти странные радиоактивные продукты были не сверхтяжелыми атомами, а изотопами хорошо известных атомов, расположенных в середине периодической системы элементов, таких, как барий, цезий, криптон, йод и многих других, каждый из которых проявлял себя в химических реакциях точно так же, как обычный атом того же элемента, в какие бы соединения он ни входил. Это было интерпретировано как разделение огромного ядра урана на два крупных осколка, не равных, но

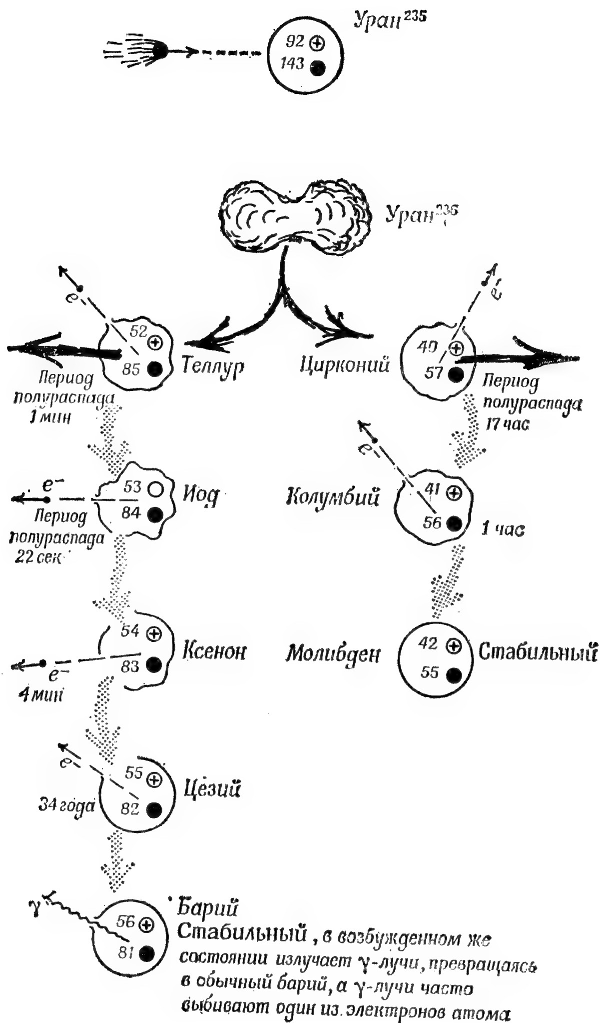
---

[1] Благодаря W. F. Libby, открывшему этот метод [см. ноябрьский номер Amer. Journ. of Phys., 26, № 8 (1958)].



Фиг. 155. Уран и нейтроны.

Представление о ядре как колеблющейся капле может совершенно неверно трактовать истинный механизм деления ядра. Эта картина может быть совершенно неоправданной при попытке описать механику микроскопического процесса, происходящего внутри ядра, хотя использование этой аналогии, с ее математическим описанием, привело к появлению плодотворных рабочих гипотез. Как бы там ни было, наблюдаемые факты таковы: нестабильное ядро U^{236} делится на два крупных неодинаковых осколка за очень короткое время, испуская при этом нейтроны.



Фиг. 156. Деление урана.

Пример «генеалогического древа» для пары возможных продуктов деления.

Ядро атома U^{236} делится различными способами. На приведенных рисунках изображен один из таких способов вместе со всеми последующими превращениями двух радиоактивных «осколков деления».

сравнимых по размеру. Это событие было названо *делением* по аналогии с процессом биологического деления клетки. Нейтрон, попадая в ядро урана, делал его нестабильным и раскалывал на две «половинки», которые разлетались друг от друга под действием колоссальной силы кулоновского отталкивания их зарядов.

Массивные «осколки *деления*» разлетались друг от друга, унося с собой громадную кинетическую энергию, в сумме около 200 *Мэв*. В камерах Вильсона это событие было сфотографировано, а энергии «осколков» измерены с помощью ионизационных счетчиков.

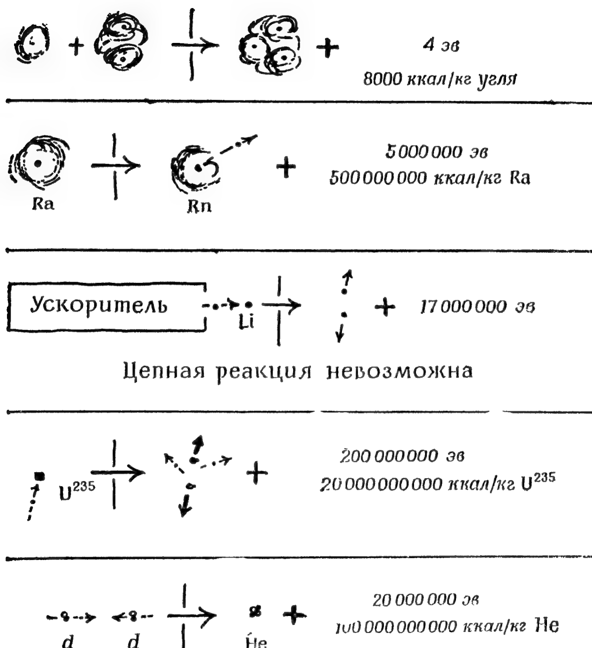
Большая часть энергии освобождается в результате простого электростатического отталкивания между «половинками» ядра, заряженными положительно (заряд каждой «половинки» по величине равен нескольким десяткам зарядов электронов), разбегающихся из своего невероятно тесного жилища. При этом важно не только то, что выделяется потрясающее количество энергии, но и то, что появляется возможность возникновения цепной реакции, *поскольку кроме осколков деления вылетает еще несколько нейтронов*. Нельзя ли устроить так, чтобы эти нейтроны делили другие атомы урана или чтобы урановый блок взрывался? В случае естественного урана — смеси изотопов — нет: нейтрон легко вызывает деление только чистого U^{235}.

Обычно нейтрон поглощается естественным ураном, его изотопом U^{238}. С помощью масс-спектрографа было показано, что уран состоит из двух изотопов U^{235} и U^{238} и очень редкого изотопа U^{234}. На масс-спектрографе же были отделены друг от друга ничтожные количества этих изотопов. Когда они были исследованы, то свойство делиться было обнаружено лишь у U^{235}. При этом деление происходило чаще при захвате медленных нейтронов, чем быстрых. Изотоп U^{238} также сильно поглощал нейтроны, особенно быстрые. Естественный уран представляет собой смесь: 99,3% U^{238} и только 0,7% U^{235}, который хорошо делится. Если деление происходит в куске естественного урана, то быстрые нейтроны, которые при этом образуются, в основном захватываются ядрами U^{238} и цепной реакции не получается. Только в куске чистого U^{235} могла бы возникнуть цепная реакция, так что он мог бы взорваться, как бомба. Многое из этого уже было известно или предполагалось к началу второй мировой войны, когда изготовление атомной бомбы стало одновременно и военной, и научной задачей.

Прежде чем обсуждать, как используется деление (а теперь и синтез), повторим некоторые ранее приведенные рассуждения о топливе и взрывах.

Замечание о мирном и военном использовании горючего

Человек не может жить без горючего: приготовление пищи, отопление и освещение, машины для фабрик, транспорта и связи — все это требует горючего в той или иной форме. Большинство орудий войны, начиная с примитивного копья, брошенного за счет поглощаемой с пищей энергии, и кончая современными снарядами, выбрасываемыми раскаленными газами, требует горючего.



Фиг. 157. На первом рисунке представлена химическая реакция $C + O_2 \rightarrow CO_2$
На других рисунках представлены некоторые ядерные превращения.

Сегодня почти все наше горючее черпается из лучей Солнца, упавших давно или падающих в настоящее время. Мы быстро тратим наши запасы солнечного света, и нашим пра-пра-пра.. праправнукам придется жить на то, что они сами заработают, т. е. на доходы, а не на проценты от капитала. Уже сейчас уровень цивилизации в существенной степени определяется запасами горючего; открытие новых его источников или потеря старых может способствовать или, наоборот, затруднять жизнь нации. Там, где запасы

нефти истощаются или уходят к другому потребителю, там, где дорожает уголь из-за естественного требования шахтеров улучшить их жизненный уровень, там, где улучшение условий жизни всего народа требует больших затрат горючего для отопления и для работы машинного оборудования, люди заинтересованы в открытии новых источников полезной энергии: они ищут новые залежи угля и нефти, строят новые плотины, ветряные двигатели и мечтают использовать ядерную энергию. В далеком будущем из-за роста населения людям, по-видимому, будет угрожать голод из-за истощения источников горючего и свежей воды, если, конечно, человек не научится использовать новые источники, такие, как те, которые в настоящее время обещает дать использование деления и синтеза ядер.

Современный снаряд вылетает из пушки благодаря превращению химической энергии в тепло и может взорваться только за счет дальнейшего мгновенного выделения тепла. И это все, что представляет собой взрыв: запас потенциальной энергии мгновенно переходит в тепло, сообщая громадную кинетическую энергию всему окружающему: газовым молекулам, осколкам бомбы... поршню автомобиля. При взрыве газ сильно нагревается и благодаря высокой скорости его молекул оказывает высокое давление. Раскаленный сжатый газ давит на окружающий воздух за счет столкновений молекул друг с другом, и его энергия разносится во все стороны сильной волной сжатия — это и есть та звуковая волна взрыва, которая при мощном взрыве приносит большие разрушения.

Запас любого вида энергии, способной выделиться мгновенно, может дать взрыв: сжатый газ в воздушном пистолете или бутылка содовой (кинетическая энергия движения молекул); хлопок в ладоши (кинетическая энергия); бензин с кислородом, порох и динамит (химическая энергия). Взрывчатое вещество не всегда взрывается — углекислый газ может просочиться под крышкой бутылки, насыпанный в кучку порох может сгореть совершенно спокойно. Чтобы происходил взрыв, энергия должна освобождаться быстро: длинная цепь маленьких взрывов способна создать лишь фейерверк. Кроме того, энергия должна выделиться в малом объеме. Именно тогда возникает резкий толчок взрывной волны, а не просто столб дыма.

Поэтому бомба должна быть сделана из компактного материала, причем при взрыве горение должно быстро распространяться по всему веществу: один кусок горящего вещества должен поджигать другой, этот — следующий и т. д. Но такая *стационарная цепная реакция* [1] горения дала бы слабый взрыв. *В развивающейся цепной реакции* воспламенение должно быстро нарастать, что произойдет, если один кусок воспламеняющегося вещества будет поджигать несколько соседних, а каждый из них — несколько других. Для иллюстрации возьмите обойму бумажных спичек и подожгите крайнюю из них. Вдоль обоймы пойдет стационарная цепная реакция. Возьмите теперь большой коробок спичек или сложите вместе несколько обойм бумажных спичек и подожгите одну из них. Получится развивающаяся цепная реакция. Разумеется, скорость цепной реакции не может расти до бесконечности, так как для этого не хватит материала. Она будет расти до некоторой максимальной величины, а затем ее рост оборвется из-за отсутствия вещества.

---

[1] Стационарно протекающая цепная реакция — это как раз то, что используется в ядерных котлах-реакторах.

Деление и захват нейтронов

При делении образуются очень быстрые нейтроны с кинетической энергией ~1 *Мэв*. Прежде чем замедлиться до «тепловых» скоростей и иметь энергию, равную средней кинетической энергии соседних атомов, они проходят свыше десятка сантиметров в окружающем уране. Для того чтобы понять устройство ядерной бомбы и ядерного реактора, необходимо знать, как зависит от скорости нейтрона вероятность его захвата ядром урана.

Краткая сводка результатов по захвату нейтронов ядрами урана

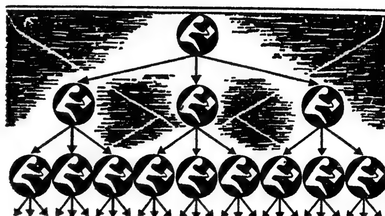
Нейтроны	U^{238}	U^{235}
Быстрые (кинетическая энергия ~ 1 *Мэв*)	Захват маловероятен (при захвате ядро может делиться)	Захват маловероятен (при захвате ядро обычно делится)
Промежуточные (кинетическая энергия ~ 5 *эв*)	ЗАХВАТ ПРОИСХОДИТ С БОЛЬШОЙ ВЕРОЯТНОСТЬЮ, приводя к образованию U^{239}, радиоактивному, излучающему β^--лучи	Захват маловероятен (если захват происходит, то ядро обычно делится)
Медленные «тепловые нейтроны» (кинетическая энергия ~ 0,03 *эв*)	Захват маловероятен (если захват происходит, он ведет к образованию U^{239})	ЗАХВАТ ОЧЕНЬ ВЕРОЯТЕН, ведет к делению ядра

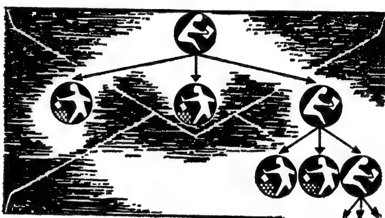
Атомная бомба. Получение U^{235}

Чтобы изготовить атомную бомбу, необходимо было выделить чистый U^{235} из естественного U^{238}, иначе последний, захватывая нейтроны, мешал бы цепной реакции.

Разделение казалось безнадежным делом, так как тот и другой уран являются атомами одного и того же элемента и, следовательно, обладают одинаковыми химическими свойствами. Были известны физические методы разделения изотопов (например, диффузионный метод разделения газов), но могли ли они быть использованы в широком масштабе, достаточном для производства необходимого для бомбы материала? (Подробности о методах, которые пытались тогда применять, о трудностях и успехах можно найти

в книгах об «атомной энергии»[1].) Один из успешных методов состоит в том, что пары гексафлуорида урана заставляют диффундировать через перегородку с очень мелкими порами. Молекулы с U^{235} обладают бо́льшими скоростями, чем молекулы с U^{238}, поэтому они проскакивают через поры быстрее. Одна стадия диффузии дает лишь слабое разделение. За тысячи же стадий — цикл за





Фиг. 158. Иллюстрация цепной реакции на модели «буквенной цепи».

Эта модель состоит в том, что читатель посылает в три адреса сообщение с одной буквой, прося каждого адресата в свою очередь послать в новые три адреса по букве. *а* — развивающаяся цепная реакция. Скорость такой реакции зависит от числа букв, посланных на каждой стадии. Скорость реакции быстро возрастает, и реакция носит «взрывной» характер. (Это модель бомбы.) *б* — стационарная цепная реакция. В данном случае скорость реакции на всех стадиях постоянна. (Это модель реактора, работающего в стационарном режиме.) (Рисунки заимствованы из книги К. Мендельсона «Что такое атомная энергия?», опубликованной Мартином, Зеккером и Варбургом в Лондоне, рисунки Виктора Рейнганума и автора книги.)

циклом, при экономном возвращении в циклы «выжатых» фракций, удается получить поток достаточно чистого U^{235}. (См. диаграммы в гл. 25, задачу 11 в гл. 25 и задачу 3 в гл. 30.)

Другой метод состоит в использовании установки, напоминающей масс-спектрограф огромного размера. На такой установке вначале получают ионы урана, затем ускоряют их до нужной энергии в электрическом поле и закручивают их траектории с помощью сильного однородного магнитного поля. Ионы описывают орбиты в форме полукруга, один конец которого выходит из жерла ионной пушки, другой упирается в маленький стакан для сбора ионов. Ионы U^{235}, как более легкие, описывают полукруг меньшего радиуса и собираются в отдельный стакан. В расчете на единицу выхода эта схема более дорогая, но с ее помощью, по-видимому, получали

[1] Прежде всего: Henry D. Smyth, Atomic Energy for Military Purposes, Princeton, 1945.

наиболее чистые образцы, необходимые для первых экспериментов. Та же установка может быть использована для разделения других, необходимых для исследования изотопов, например продуктов деления.

Ясно, что, когда военным властям предложат новую взрывчатку, они зададут очевидный вопрос: «Вы уверены, что она сработает? А нельзя ли попробовать взорвать маленький образец?» В данном случае на оба эти вопроса ученые ответили: «Нет». Они добавили: «Мы надеемся, что она *сработает*, и наша надежда основана на прочной теории. Мы знаем, что маленькая бомба *не сработает*». Причина, по которой они настаивали именно на большой бомбе, заключалась в следующем: при каждом делении урана испускается лишь несколько нейтронов, и их легко потерять. Для того чтобы выделение энергии в цепной реакции происходило со взрывом, эти нейтроны должны способствовать новому делению. Они не должны поглощаться другими атомами, такими, как U^{238}, но и не должны быть потеряны. А потерять нейтрон очень легко — ведь он так ловко проскакивает через вещество. Из маленькой бомбы нейтроны, возникшие при делении, все выскочили бы, и попытки взорвать ее окончились бы неудачей. В очень большой бомбе, содержащей кусок U^{235}, нейтроны деления сновали бы между атомами урана до тех пор, пока не столкнулись бы с ними и не вызвали новые акты деления.

Бомба небольшого размера *не может* взорваться, большая — *обязана*. Между этими двумя предельными размерами существует определенный «критический размер», такой, что кусок U^{235}, меньший критического размера, не взорвется, а больший — взорвется.

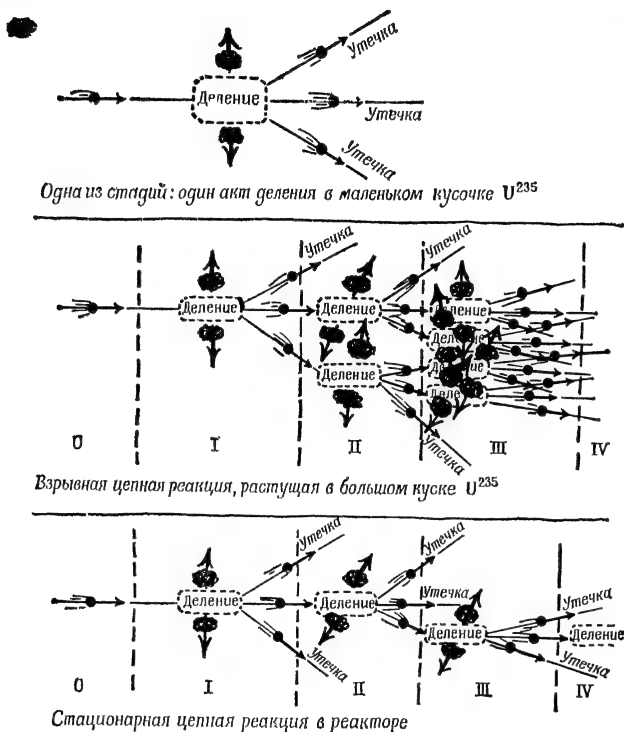
Критический размер составляет всего несколько кубических сантиметров, а вес — лишь несколько килограммов: уран настолько тяжел, что его 1 *см*^{3} весит около 0,02 *кг*. Критический размер считался военным секретом, но, зная «размеры» ядер [1], можно было легко догадаться, каков он. Теперь, когда хорошо известны площади мишеней — ядер U^{235} по отношению к захвату нейтронов (поперечные сечения захвата нейтронов), критический размер

---

[1] Из экспериментов по рассеянию протонов высокой энергии или α-частиц следует, что, начиная с расстояний порядка 10^{-14} *м* от центра атома, единственная действующая сила — это обратно пропорциональная квадрату расстояния сила Кулона. На этих расстояниях с ней начинают конкурировать «ядерные силы связи», а на меньших — превосходят ее. Поэтому говорят, что радиус легких ядер составляет $\sim 10^{-15}$ *м*, а радиус тяжелых — в несколько раз больше. Для радиусов многих ядер эксперименты по рассеянию *нейтронов* дали такого же порядка величину, но для хороших поглотителей, таких, как кадмий, во много раз большую.

может вычислить любой достаточно образованный физик-теоретик любой страны.

Для взрыва обычной бомбы необходим взрыватель или детонатор. В случае атомной бомбы дело обстоит иначе. Большая бомба взорвется сразу, как только случайные нейтроны, всегда присутствующие в космических лучах (или возникающие при спонтанном

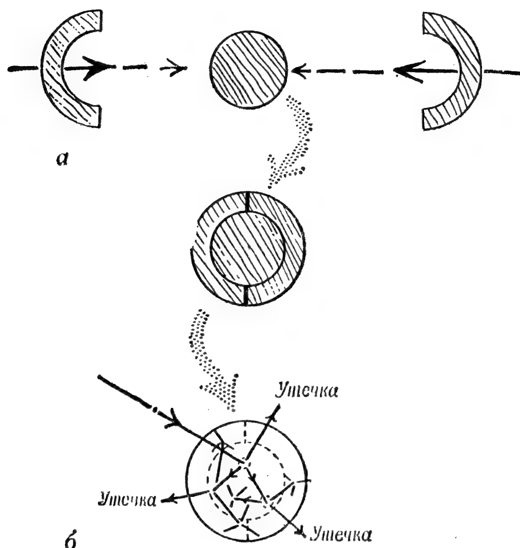


Фиг. 159. Деление урана: цепная реакция.

Рисунки весьма схематичны. Клетка с надписью «деление» обозначает именно это событие. Нейтроны, возникающие при делении, разлетаются во все стороны. На рисунке же они показаны вылетающими вперед, чтобы показать последовательные стадии процесса размножения.

делении), вызовут в ней хотя бы одно деление. Следовательно, бомбу необходимо изготовлять из кусков, каждый из которых имеет размер, меньший критического, и не может взорваться самопроизвольно. Далее эти куски необходимо соединить быстро, на-

столько, чтобы бомба не успела взорваться раньше, чем она будет полностью собрана. Нужно взять, скажем, два куска U^{235}, каждый размером $^3/_4$ критического, и мгновенно стукнуть их друг о друга так, чтобы получился кусок в $1^1/_2$ критического размера, который



Фиг. 160. Принцип устройства атомной бомбы. (Весьма схематическое изображение.)

а — в куске делящегося материала, например U^{235}, размер которого меньше критического, цепная реакция не может развиваться из-за утечки нейтронов; *б* — кусок делящегося материала с размером больше критического можно составить из более мелких кусков. В большом «блоке» цепная реакция, начавшись, будет нарастать взрывным образом. В разгоняющейся цепной реакции нейтроны, возникающие в каком-либо делении, дают более чем одно новое деление. Однако имеет место утечка большого числа нейтронов.

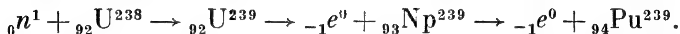
бы после этого взорвался. Это можно сделать быстро, скажем, выстрелив из маленькой пушки одним куском урана по другому. Как это делается в действительности, — наверно, военный секрет. Самый же главный «секрет» [1] — то, что это вообще можно сделать, — был разглашен самим взрывом атомных бомб.

[1] Люди, далекие от науки, часто недооценивают трудностей (и стоимости) соблюдения научной тайны. Они даже заблуждаются относительно существа проблемы. Многие же ученые сожалеют о том, что она существует, считая, что секретность тормозит научный прогресс. Чтобы проиллюстрировать эту трудность, представим себе следующее: допустим, что по всему миру распространилась какая-то неизвестная болезнь. Вдруг в одной из стран

При взрыве атомной бомбы массой порядка 2,5 кг урана рассеивается много неподелившегося материала. Поэтому нельзя оценить всю выделившуюся энергию, считая, что каждый атом U^{235} дает 200 *Мэв.* Но даже с поправкой на неполное использование материала и на утечку нейтронов энергия, выделяющаяся при взрыве бомбы, огромна. Выделение энергии (кинетической энергии осколков деления) настолько велико, что взрыв сопровождается мощным потоком все испепеляющего излучения и сильнейшей ударной волной сжатия. Продукты деления, избыточные нейтроны [1] и гамма-лучи способны производить сильные и глубокие радиационные повреждения.

Реакторы. Производство плутония

После открытия деления была прослежена судьба поглотившего один нейтрон атома U^{238} [2]. Новое ядро, U^{239}, нестабильно, оно излучает β-лучи и скоро превращается в атом неизвестного элемента, стоящего за ураном в периодической системе элементов. Ядро $_{92}U^{239}$ излучает $\bar{\beta}$-лучи и становится $_{93}?^{239}$. Новый элемент тоже нестабилен. Он, излучая β-лучи, превращается в другой неизвестный элемент. По аналогии с планетами следующие за ураном новые элементы были названы нептунием и плутонием.



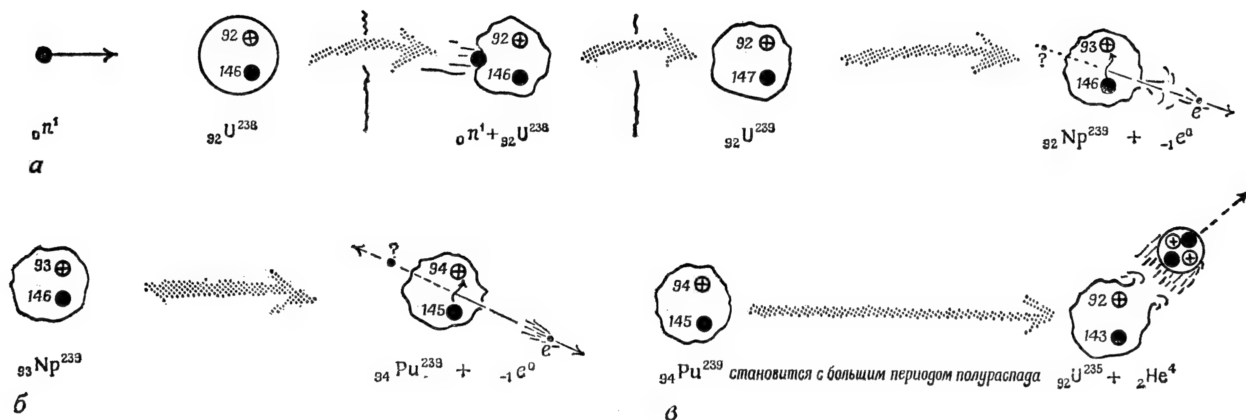
$$_0n^1 + {}_{92}U^{238} \rightarrow {}_{92}U^{239} \rightarrow {}_{-1}e^0 + {}_{93}Np^{239} \rightarrow {}_{-1}e^0 + {}_{94}Pu^{239}.$$

Из теории, достаточно хорошо описывающей свойства ядер, следовало, что плутоний должен так же хорошо делиться, как и U^{235}. Опыты по бомбардировке крошечных образцов на циклотроне подтвердили это. Таким образом, возможен новый материал

много людей было вылечено, но «как» — оставалось тайной, разве что пошел темный слушок: «...с помощью листьев кокосовой пальмы». Сколько времени потребуется медицинским учреждениям какой-либо крупной страны на раскрытие тайны? Услышав о кокосовой пальме, они сузят поле своих поисков до необходимого размера, а правительство страны, зная, что лечебное средство существует, охотно и быстро выделит для этой цели необходимые средства и оборудование.

[1] Нейтроны сами непосредственно не создают ионов, но они выбивают протоны, которые способны это делать. Именно так нейтроны повреждают живые клетки.

[2] При поглощении быстрого нейтрона U^{238} деления происходят, но не так часто, чтобы сама цепная реакция поддерживалась в U^{238} или смешанном уране. Время от времени ядро U^{238} делится спонтанно, т. е. без поглощения нейтрона. Спонтанное деление может дать тот самый первичный нейтрон, который дает начало цепной реакции.



Фиг. 161. Получение плутония.

а — уран и нейтроны. Время от времени быстрый нейтрон захватывается ядром U^{238}, причем последнее становится более тяжелым ядром урана. Это ядро нестабильно (радиоактивно), оно излучает β-лучи. Так как такое ядро урана перенасыщено нейтронами, оно заставляет один из его нейтронов превратиться в протон, причем возникающий + заряд компенсируется — зарядом, уносимым β-лучом. Новое ядро имеет заряд +93 *e*, т. е. оно является ядром нового элемента, на одну клетку отстоящего от урана в периодической системе элементов. Этот элемент называется *нептунием*; *б* — ядро атома нептуния нестабильно. Оно излучает β-лучи, превращаясь в ядро плутония. Плутоний от урана можно отделить химическим путем; *в* — плутоний, как и U^{235}, является делящимся материалом. Кроме того, он нестабилен, так же как уран или радий, и, излучая α-частицу, превращается в U^{235}.

для бомбы, причем гораздо более просто получаемый. Плутоний отличается по своим химическим свойствам от урана, поэтому его можно отделять *химическим* способом.

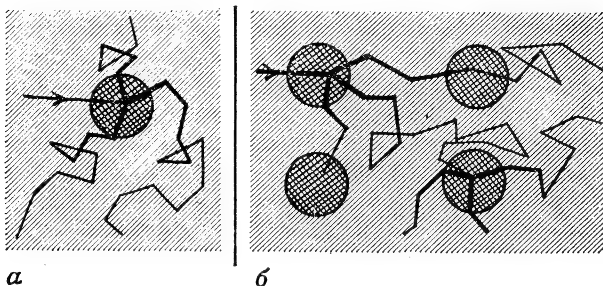
Это был новый элемент, ранее неизвестный, получаемый в ничтожном количестве на циклотроне: зачастую всего лишь несколько атомов. Нельзя ли получить его в большом количестве для изготовления бомбы? Когда нейтроны простреливают толстый блок естественного урана, они почти все поглощаются атомами U^{238}, рано или поздно давая плутоний. Но где взять громадное количество необходимых для этого нейтронов? От делящегося U^{235}.

При делении возникают очень быстрые нейтроны, которые скоро замедляются, сталкиваясь с окружающими ядрами. К сожалению, ядра U^{238} настолько сильно поглощают нейтроны *промежуточной энергии*, что для начала деления U^{235} и тем самым для поддержания потока нейтронов не осталось бы ни одного нейтрона. *Медленные нейтроны*, наоборот, легко поглощаются U^{235}, вызывая его деление. Так что задача состояла в том, чтобы замедлить нейтроны и не дать им всем успеть поглотиться в случае, когда они имеют промежуточную скорость. Тогда была предложена и опробована следующая схема, приведшая в конце концов к успеху. Большие блоки урана (U^{235} и U^{238} в природной смеси) помещались в огромный реактор. заполненный каким-нибудь легким элементом, действовавшим как *замедлитель*. В замедлителе нейтроны тормозились, не поглощаясь, благодаря (редким) упругим столкновениям с его ядрами, в каждом из которых терялась малая доля их энергии. Вода была бы идеальным замедлителем, если бы входящий в ее состав водород не имел тенденции захватывать нейтроны, превращаясь в «тяжелый водород» — дейтерий. Сам дейтерий тяжелой воды тоже был бы хорошим замедлителем, но отделение тяжелой воды от обычной стоит дорого. Довольно хорошим замедлителем является чистый углерод, ядра которого только в 12 раз тяжелее нейтрона. (В *лобовом* соударении нейтрон теряет 15% своей кинетической энергии.) Вылетевшие при делении U^{235} нейтроны блуждают по урану и замедлителю до тех пор, пока они не замедлятся до скоростей молекул газа, находящегося при комнатной температуре, т. е. до «тепловых энергий», составляющих примерно $^1/_{30}$ *эв*. Тогда с большей вероятностью они поглощаются U^{235} (и вызывают новое деление), чем U^{238}. Атомов U^{238} гораздо больше, но они захватывают нейтроны промежуточных скоростей и очень слабо — медленные нейтроны.

При определенном соотношении между урановыми блоками и окружающим замедлителем в таком *реакторе* нейтроны ведут

себя следующим образом: один из нейтронов, возникающих при каждом делении U^{235}, замедляется, а затем осуществляет новое деление U^{235}. Остальные нейтроны, вылетающие при делении U^{235}, как быстрые, так и медленные, захватываются атомами U^{238} и ведут к образованию плутония.

Подобно бомбе, самоподдерживающийся реактор должен обладать размером больше некоторого критического, иначе из него будет выходить слишком много нейтронов [1].



Фиг. 162. Реактор; нейтроны в «ядерном котле» из урановых блоков, окруженных замедлителем.

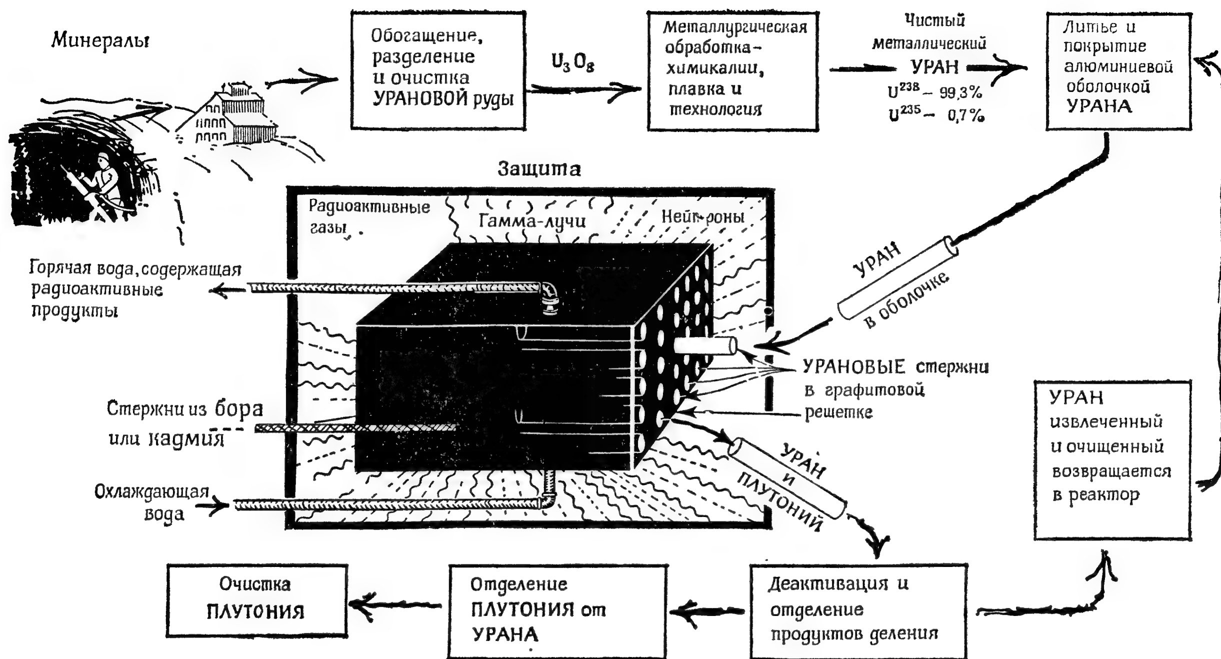
(Прямыми отрезками показан путь нейтронов между отдельными столкновениями. Различная толщина отрезков характеризует величину скорости нейтрона.) *а* — нейтрон вызывает деление, в результате которого возникают 3 нейтрона; *б* — нейтрон вызывает деление; один из образовавшихся 3 нейтронов вызывает новое деление. Другой поглощается ядром U^{238}.

Критический размер для реактора на естественном уране с графитовым замедлителем равен примерно размерам коттеджа, даже если он окружен отражателем нейтронов из тяжелого металла. Непрерывно «сгорая», U^{235} дает не только нейтроны, но колоссальный поток тепла, за счет осколков деления. Для охлаждения реактора необходимы громадные вентиляторы или целые реки воды. Тепло можно использовать для производства полезной энергии в большом масштабе. При этом, однако, возникает серьезная проблема защиты от радиоактивности.

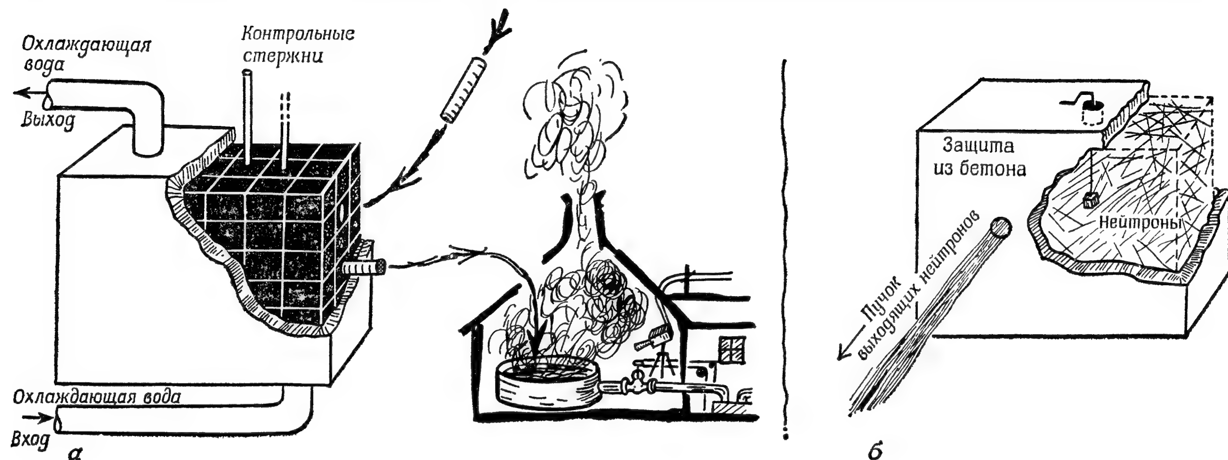
Чтобы получить плутоний, необходимо извлечь уран из реактора, растворить его и химическим путем отделить плутоний от неиспользованного урана и продуктов деления. Так как такая смесь

---

[1] Диффузия нейтронов, выделившихся в активной зоне реактора, к поверхности реактора происходит по «закону Фика», т. е. аналогично тому, как происходит диффузия растворенной в воде соли. Этот закон иллюстрирует еще одно решение уравнения $\nabla^2 V = 0$.



Фиг. 163. Схематическое изображение, дающее общее представление о процессе получения плутония.



Фиг. 164. Реактор (схематический вид).

а — в «ядерном котле», состоящем из урановых блоков, помещенных в графитовый замедлитель, и окруженном защитной оболочкой, охлаждающей воде сообщается громадное количество тепла. При делении U^{235} возникают осколки деления, выделяются тепло и нейтроны. Один из нейтронов деления вызывает новое деление, поддерживая цепную реакцию на стационарном уровне. Другие нейтроны теряются из-за утечки либо поглощаются U^{238}, который в результате последовательных двух превращений становится плутонием. Затем урановые блоки извлекаются и подвергаются химической обработке, выполняемой на расстоянии с помощью манипуляторов, с целью отделить плутоний и продукты деления от «несгоревшего» урана, *б* — реактор для получения радиоактивных атомов. Внутри защитной оболочки находится газ нейтронов, движущихся подобно молекулам сквозь графитовый замедлитель и урановые блоки. Образец, помещенный в такой «нейтронный газ», подвергается обстрелу большого числа нейтронов, в результате чего некоторые из атомов превращаются в другие атомы, среди которых могут оказаться радиоактивные. Пучок нейтронов, выходящий через отверстие в оболочке реактора, также можно использовать для облучения образцов.

обладает высокой радиоактивностью, это разделение должно производиться на расстоянии. Полученный плутоний служит материалом для изготовления атомных бомб или компактных реакторов, используемых в качестве источников тепловой энергии.

Открытие плутония — выдающееся достижение. Человек сумел получить доселе не известный *элемент*, причем не в количестве одного-двух атомов, а сотни граммов.

Использование нейтронов в реакторах

Успешное использование реакторов зависит от числа нейтронов, возникающих при одном акте деления U^{235}. Этих нейтронов не слишком много, но достаточно, чтобы мог работать крупный реактор. При делении возникает иногда 1 нейтрон, иногда 3, иногда больше. В среднем на одно деление U^{235} приходится около 2,5 нейтрона. Эта величина имеет очень важное экономическое значение. Если бы это число равнялось 1,00 или меньше, цепная реакция была бы невозможна. Но если бы оно было во много раз больше, скажем 10, цепная реакция развивалась бы легко и критический размер был бы мал.

Из среднего числа нейтронов деления, равного 2,5, один нейтрон может вызвать новое деление, а один или два нейтрона могут:

а) избегнув захвата, выйти из реактора или поглотиться, не дав никакого выхода;

б) вызвать новое деление и, следовательно, способствовать развитию *взрывной* цепной реакции;

в) образовать новое делящееся ядро, например поглотиться в U^{238}, которое затем превращается в ядро плутония.

Реакторы с расширенным воспроизводством ядерного горючего (бридерные реакторы)

Грамотно сделанный реактор должен быть достаточно велик по размерам, чтобы утечка нейтронов была мала, и изготовлен из материалов, поглощение нейтронов в которых не проходит даром. В таком реакторе может быть столько нейтронов деления, что число образующихся атомов плутония больше числа делящихся атомов U^{235}. Это так называемый «реактор с расширенным воспроизводством горючего», т. е. реактор, в котором образуется больше нового делящегося вещества (из U^{238}), чем сгорает U^{235}, или плутония.

Так же как и в других реакторах, в рассматриваемом реакторе выделяется громадное количество тепла: акты деления происходят непрерывно, с *постоянной скоростью*, причем в каждом выделяется около 200 *Мэв*. Это тепло отводится циркулирующим потоком жидкости или газа, и реактор может служить источником полезной энергии.

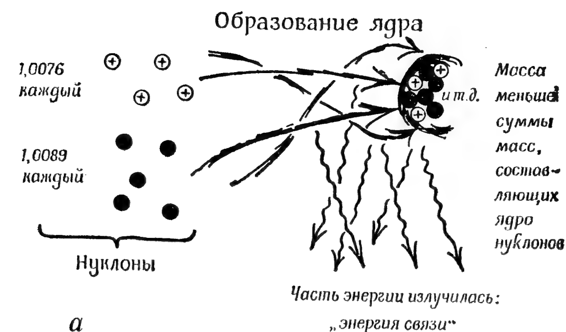
Будущее ядерной энергетики

Можно знать, как нужно облучать стабильный атом маленькими снарядами, такими, как нейтрон, чтобы получить нестабильное ядро. Но отсюда совсем неясно, какая при этом выделится энергия. Тем не менее величину выделяемой энергии в *ядерных* событиях можно предсказывать на основании точных масс-спектрографических измерений масс. Для этого нужно воспользоваться соотношением $E=mc^2$. Если известно, на какие продукты распадается ядро лития при бомбардировке, энерговыделение можно вычислить по измеренным массам. Аналогично, если известно, на какие продукты делится ядро U^{235}, можно предсказать величину выделяемой энергии. Более того, можно четко указать, при делении каких элементов энергия будет выделяться.

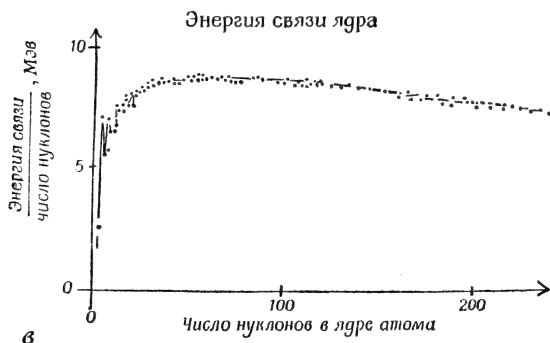
Считается, что ядро состоит из *протонов* и *нейтронов*, которые объединяются общим названием *нуклоны*. Представим себе процесс образования ядра из отдельных нуклонов. При сближении нуклоны должны притягиваться друг к другу и, образуя ядро, *должны отдать часть своей энергии*. При этом они оказываются тесно связанными, так что для того, чтобы оторвать их снова друг от друга, необходимо затратить определенную энергию. Поскольку нейтроны при объединении отдают часть своей энергии, получающееся ядро обладает несколько меньшей массой. Если бы при упаковке в ядро нуклоны не притягивали друг друга с большой силой, масса ядра была бы равна сумме масс образующих его нуклонов. В качестве примера рассмотрим какое-нибудь ядро, скажем литий. Ядро ${}_3Li^7$ состоит из 3 протонов и 4 нейтронов. Согласно измерениям (на масс-спектрографе), его масса в атомных единицах равна 7,0165. Масса свободного протона равна 1,0076, а нейтрона 1,0089. Сумма масс

$$3\cdot 1{,}0076+4\cdot 1{,}0089=7{,}0588.$$

Эта сумма больше истинной массы, равной 7,0165. Поэтому при объединении в ядро Li^7 нуклоны «потеряли» некую часть своей массы, или, точнее, при этом выделилась энергия, унесшая

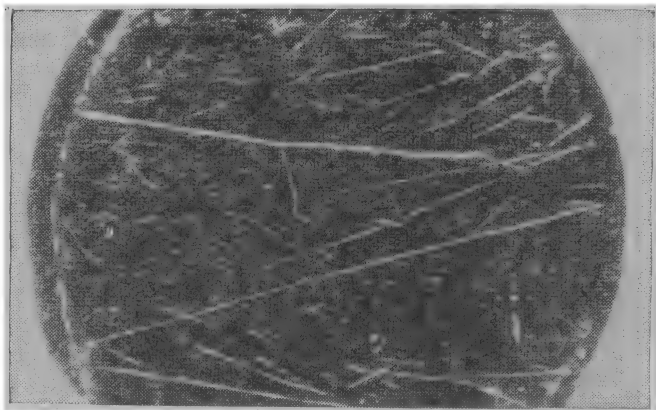






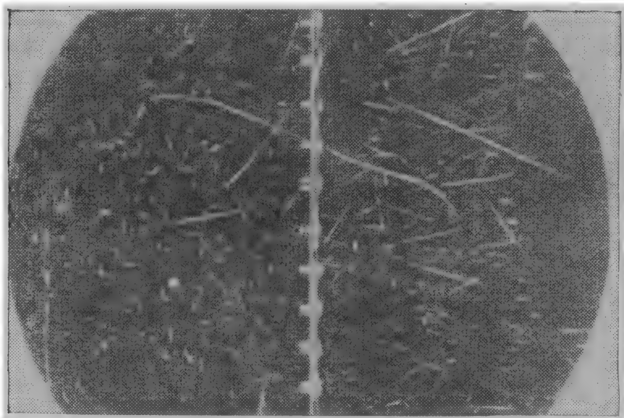
Фиг. 165. Энергия связи.

а — энергия связи равна той энергии, которая выделилась бы, если бы нейтроны и протоны соединить вместе и образовать составное ядро; *б* — поэтому энергия связи равна той энергии, которую нужно затратить, чтобы ядро разбить на куски; *в* — энергия связи на нуклон — наибольшая для самых стабильных ядер средних элементов.



Фиг. 166. Треки осколков деления на фотоснимках в камере Вильсона.

На этих снимках осколки деления оставили толстые треки, что свидетельствует о большой величине заряда осколков. Некоторые из треков меньшей толщины созданы протонами, выбитыми нейтронами пучка, другие — α-частицами из урана (J. K. Boggild, K. J. Brostrom, T. Lauritsen, Royal Danish Academy of Arts and Science). Трек осколка деления ядра урана (слева) при облучении нейтронами. Осколок деления, двигавшийся через газовую смесь водорода и водяного пара, выбивал вперед и вбок (короткие следы) протоны, испытав одно сильное столкновение с ядром кислорода (длинный трек).



Фиг. 167. Треки двух осколков деления ядра урана, выходящие из тонкой металлической пластинки, помещенной посреди камеры.

эту массу с собой. Казалось бы, потеря массы невелика, но она отвечает огромной энергии (45 000 000 *эв* на одно образовавшееся ядро Li^7).

Подобный эффект имеет место для любого ядра в периодической системе элементов (кроме H^1): масса ядра всегда меньше суммы масс составляющих его нуклонов. Поэтому при образовании



Фиг. 168. Фотоснимок в камере Вильсона: космические лучи.

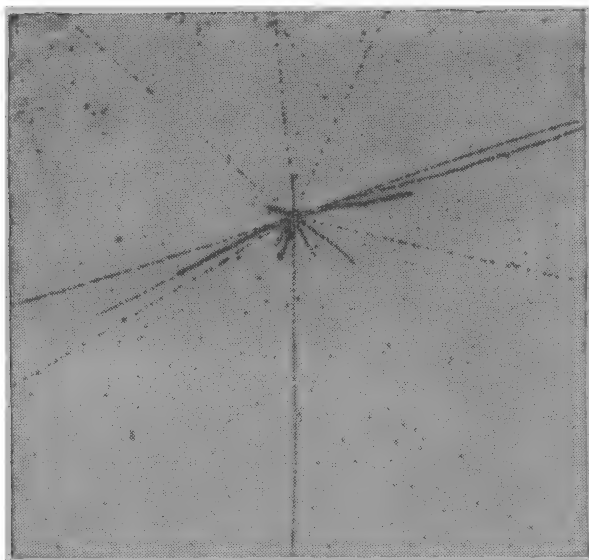
Частицы космических лучей, проходя сквозь слой плотного вещества над камерой, создают электроны и позитроны (быстрые и медленные), оставляющие след в камере, помещенной в сильное магнитное поле. На снимке видно необычное событие распад нестабильной частицы (два жирных трека в виде буквы *V*).

любого ядра из протонов и нейтронов, а это возможно, должна выделяться огромная энергия. Эта энергия называется *энергией связи* ядра. Иными словами, *энергия связи* — это *энергия, которую необходимо затратить, чтобы разорвать ядро на отдельные нуклоны.*

При объединении в ядро составляющие его нуклоны должны потерять часть своей массы — массу, отвечающую энергии связи.

По измеренным массам атомов можно вычислить энергию связи и, зная ее величину, предсказать величину энергии, которая должна выделиться в том или ином ядерном событии, малая при бомбардировке или большая при делении и синтезе ядер.

Однако в силу того, что нам приходится иметь дело с разными ядрами, распадающимися различными путями, подсчет энергии легче производить, если пользоваться МАССОЙ, ПРИХОДЯЩЕЙСЯ



Фиг. 169. Треки в фотоэмульсии.

Треки частиц здесь образуют не капельки воды, как в камере Вильсона, а почернение в фотоэмульсии из-за выделившихся частичек серебра. На этом фотоснимке, сильно увеличенном, показана «звезда», или «взрыв» ядра частица космических лучей столкнулась с одним из ядер фотоэмульсии, вероятно с ядром серебра, и разбила его на 7 протонов, 5 альфа-частиц и несколько тяжелых осколков. Трек первичной частицы не виден.

НА ОДИН НУКЛОН, т. е. отношением МАССЫ ВСЕГО ЯДРА К ПОЛНОМУ ЧИСЛУ НУКЛОНОВ. Тогда ясно, что если в каком-либо событии масса на один нуклон уменьшилась, то нуклоны потеряли часть своей массы и, следовательно, при этом выделилась какая-то энергия. Поэтому обычно рисуют очень важный график:

МАССА НА ОДИН НУКЛОН в зависимости от МАССОВОГО ЧИСЛА

для всех элементов. Из этого графика сразу видно, какую массу потерял каждый нуклон при образовании того или иного атома: достаточно сравнить значение массы на один нуклон в этом атоме со средней массой изолированного нуклона — величиной, значение которой лежит где-то между 1,0076 для протона и 1,0089 для нейтрона, скажем 1,0083. Чем ниже точка, отвечающая тому или иному атому на графике, тем больше его энергия связи.

масса на один нуклон вычисляется следующим образом:

$$\text{масса на один нуклон} = \frac{\text{масса ядра}}{\text{число нуклонов}},$$

где

масса ядра = масса нейтрального атома — масса его электронов.

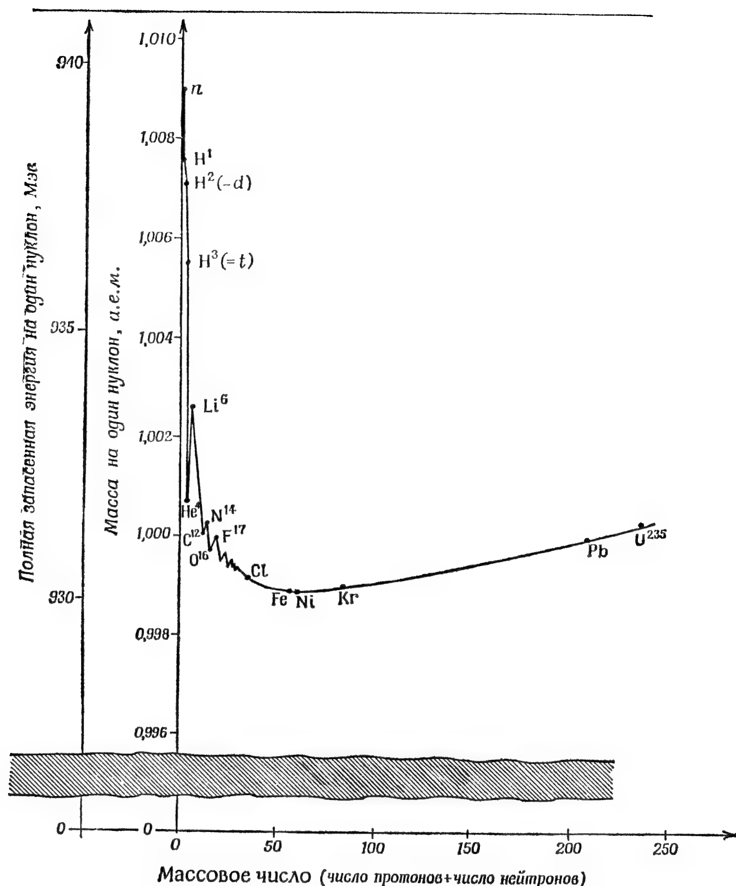
масса атома (или, точнее, его иона⁺) измеряется на масс-спектрографе с высокой точностью; она выражается в атомных единицах массы (в этих единицах масса O^{16} равна 16,0000); число нуклонов в атомном ядре (протоны + нейтроны) — его массовое число — это масса атома (в атомных единицах массы) («атомный вес»), округленная до ближайшего целого числа.

Для любого атома в периодической системе элементов, равно как и для всех его изотопов, масса ядра (в атомных единицах массы) мало отличается от целого числа. Например:

масса водорода равна примерно 1, точнее 1,0076
масса лития 7,0165
масса железа меньше 56, а именно 55,938
масса ядра урана 235,068

Это целое число (1,... 7,... 56,... 235,...) означает число нуклонов в ядре, т. е. его массовое число. Разности между атомными (или ядерными) массами и целыми числами показывают различия в энергиях связи — в величине энергии, выделяемой при объединении нуклонов в ядро.

Если массу ядра разделить на число нуклонов, т. е. на массовое число, то получаются величины, которые начинаются с 1,009 для нейтрона и 1,008 для протона, а затем падают по величине до минимального значения, равного 0,9993 для «средних элементов», таких, как железо, медь, бром, криптон, и далее медленно возрастают примерно до 1,0003 в случае урана. Поэтому, *если бы* тяжелое ядро можно было поделить на два промежуточных ядра, то его нуклоны потеряли бы значительную массу в силу

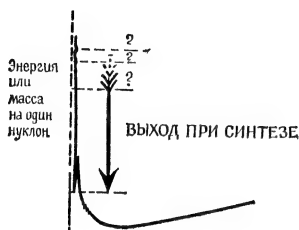


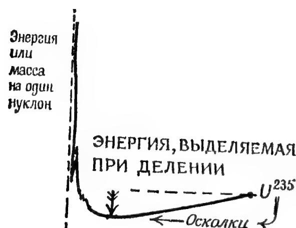
Фиг. 170. Кривая «масса, приходящаяся на один нуклон в ядре», в зависимости от массового числа:

$$\text{Масса, приходящаяся на один нуклон} = \frac{\text{Масса ядра, найденная с помощью масс-спектрографа}}{\text{Полное число протонов и нейтронов}}$$

большого выделения энергии. Как это видно из графика от урана к средним элементам, масса на один нуклон падает примерно на 0,001. Для 235 нуклонов в ядре U^{235} масса, отвечающая выделенной энергии, была бы равна 235·0,001, т. е. 0,235 а. е. м. Энергия, отвечающая такой массе, равна 0,235·931 *Мэв*, т. е. около 200 *Мэв*.







Фиг. 170 (продолжение)

Из графика следует, что энергия при делении может выделяться только в случае тяжелых ядер. Ядра средних элементов — самые стабильные: их нуклоны не могут потерять массу, в какую бы сторону ни двигаться на графике: влево или вправо, т. е. они обладают самой большой энергией связи.

Энергия, выделяющаяся при синтезе ядер

Энергия может выделяться не только при делении, но и при синтезе, т. е. при *слиянии* легких ядер. Кривая на графике падает от легких ядер к средним, а это значит, что при синтезе должна выделяться энергия. В отличие от деления для синтеза нет необходимости в нейтронах. В этом случае задача состоит в том, чтобы, преодолев электрическое отталкивание, сблизить легкие ядра на достаточно малые расстояния друг от друга, где уже начинают действовать между ними ядерные силы притяжения. Если бы можно было заставить два протона и два нейтрона объединиться в ядро атома гелия — или же четыре протона с соответствующими превращениями,— то при этом выделилась бы огромная энергия. Заставить сблизиться ядра можно с помощью нагрева до высоких температур, когда в результате обычных столкновений ядра смогут сблизиться на столь малые расстояния, чтобы ядерные силы вступили в игру, и произошел синтез. Начавшись, процесс синтеза, по-видимому, сможет дать такое количество тепла, которое нужно для поддержания высокой температуры, необходимой для дальнейших слияний ядер. При этом получился бы грандиозный фейерверк, размеры которого контролировались бы только количеством необходимого материала. Такой процесс, по-видимому, происходит в горячих звездах. Вероятно, что многостадийный процесс «горения» водорода, в результате которого происходит синтез ядер гелия, является источником непрерывного потока солнечной радиации.

Что касается наших технических возможностей, то синтез ядер обычного водорода требует слишком высоких температур — или же слишком большого времени, за которое успевали бы происходить случайные столкновения необычайной силы, чтобы его можно было использовать. Ядра тяжелого водорода, дейтроны, легче синтезировать, но это также задача исключительной трудности. Лучше использовать тритоны, еще более тяжелые ядра водорода, для соединения их с ядрами водорода или дейтерия. Однако тритий (сверхтяжелый водород) нужно получать в реакторе, и он дорого стоит.

Нельзя ли использовать еще более тяжелые атомы? Следующими по списку идут изотопы лития, которые могли бы служить материалом для компактной термоядерной бомбы. Вероятно, у такой бомбы запалом должна служить бомба из *делящегося* вещества.

Проблема использования синтеза ядер в мирных целях, например для производства электрической энергии, упирается в

очень трудную проблему *удержания* реакции. Газ должен быть раскален, скажем, до 50 000 000° С, и любая твердая оболочка, соприкоснувшись с ним, обратится в пар. Если к тому же при синтезе выделяется полезное тепло, то задача удержания реакции еще больше усложняется. Однако можно надеяться удержать реагирующие вещества с помощью электромагнитного поля. Ведь можно же подвешивать в воздухе магнит с помощью других магнитов, хотя такое равновесное положение и является неустойчивым. Если пропускать ток достаточно большой силы через газ, то образуются потоки электронов и положительных ионов, движущихся навстречу друг другу. Под действием магнитного поля, которое окружает ток, такая колонна движущихся зарядов будет сжиматься в узкий шнур. В этом заключается так называемый пинч-эффект. Пинч-эффект и силы, создаваемые внешними магнитными полями, меняющимися по определенному закону, можно использовать для удержания *плазмы* — смеси быстро движущихся ядер и электронов в «магнитной бутылке», где происходит реакция синтеза.

ГЛАВА 44 • ДАЛЬНЕЙШАЯ ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ. ФИЗИКА СЕГОДНЯ

«Каждая новая теория... полагает, что она наконец является той счастливой теорией, которая дает «правильный» ответ... Если мы будем знать, что логика, математика, физическая теория являются лишь нашими изобретениями для формулировки в компактной и доступной для обращения форме того, что мы уже знаем, и, подобно всем изобретениям, не достигают полного успеха в том, для чего они были предназначены, и еще меньшего успеха вне области своего первоначального предназначения, и что наша единственная надежда проникнуть с помощью этих изобретений в нечто совсем неизвестное основана на прошлом опыте, почему же иногда мы были настолько удачливы, что смогли продвинуться хоть на короткое расстояние за счет приобретенной инерции?»

П. У. Бриджмен, 1936
«Природа физической теории»

«В полночном молчании времени снов,
Когда вы освобождаете свое воображение...»

Роберт Браунинг

[Эта последняя глава не столько заканчивает курс, сколько связывает его с будущими самостоятельными исследованиями и чтением литературы. Ее следует читать на досуге, для «души». Она не может полностью снабдить вас всеми современными знаниями в окончательном виде. Вместо этого у вас останутся сомнения и обрывки незаконченного знания — а этим характеризуются границы любой развивающейся науки.]

КЛАССИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

К началу этого века на протяжении жизни примерно сотни (или около этого) поколений человечество создало огромный каркас физической науки:

Статика блоков и тросов, колонн, мостов, ..., правила равновесия }

Динамика движущихся тел, сила и масса, законы движения, энергия и импульс *Гидростатика* насосов, давление воздуха, условия плавучести судов и их остойчивости, ..., законы давления в жидкости, закон Бойля, ... *Гидродинамика* потоков жидкости как при ламинарном, так и при вихревом движении	ОБЪЕДИНЕНЫ ЗАКОНАМИ НЬЮТОНА
Электромагнетизм зарядов, токов, магнитов, ..., полей, ... *Оптика* световых лучей, движущихся по прямой и отклоняющихся под действием линз с образованием изображения, волновое поведение при дифракции и интерференции, электромагнитная теория света	ОБЪЕДИНЕНЫ ЗАКОНАМИ (УРАВНЕНИЯМИ) МАКСВЕЛЛА
Акустика: физика музыкальных инструментов и звуковые волны *Теплота*: термометрия и калориметрия, теплота как форма энергии *Свойства вещества*: упругость, трение твердых тел и жидкостей, поверхностное натяжение и т. д.	ОБЪЕДИНЕНЫ С МЕХАНИКОЙ
Кинетическая теория газов и рассмотрение теплоты как молекулярного движения (движения молекул) *Поведение атомов и молекул* в кристаллических структурах, при поверхностном натяжении, упругость, диффузия	МЕХАНИКА, ПРИМЕНЕННАЯ К СОВОКУПНОСТИ НЕВИДИМЫХ МАЛЫХ ЧАСТИЦ
Термодинамика: соотношение между теплотой, работой и материей	РАССМАТРИВАЛИСЬ КАК ВСЕОБЩИЕ ПРАВИЛА

Рядом с физикой в огромную науку о структуре и свойствах молекул развилась химия:

Неорганическая Химия: химические реакции и их характеристики, интерпретируемые в терминах элементов, соединений, атомов и молекул

Органическая Химия: изучение углеродных соединений, содержащихся в живой материи: почти бесконечное семейство молекул — исследованных, внесенных в каталоги, наглядно изображенных «структурными формулами» и даже синтезированных из элемен-

тов, — заключенное в пределах от простой молекулы CO_2 до огромных и сложных протеиновых молекул.

Физическая Химия: изучение физического действия химических процессов: теплота реакции, теплота растворения; измерение массы молекулы по давлению паров, по изменению осмотического давления, по изменению точки замерзания растворов; механика и статистика химических реакций и т. п.

Однако между Физикой и Химией оставался большой разрыв. Химики все шире использовали физические инструменты, но, как ни странно, физики зачастую оставались в стороне и теряли хорошие возможности связать химические превращения и достижения в области физических знаний.

Выделились, сохраняя в то же время сильную связь с физикой и химией, другие науки — астрономия, минералогия и т. п. Во всей физической науке возникли в качестве надежных результатов и критериев определенные всеобщие правила, или Принципы: векторное сложение скоростей, сил и т. п.; галилеевская относительность; ньютоновские законы движения; постоянство массы; сохранение импульса, сохранение энергии; закон тяготения; закон Кулона и содержащие его уравнения Максвелла; трактовка света и др. как электромагнитных волн; неделимость атомов, идентичность всех атомов данного элемента.

Физику, развитую в это время, называют теперь *Классической Физикой*. Она казалась хорошо понятой, завершенной (за исключением мелких деталей), точной и вполне удовлетворительной. Кое-что из нее было распространено вниз (по масштабной шкале изучаемых объектов) на атомы и молекулы и вверх на солнечную систему в предположении, что там применимы те же самые общие правила и принципы. Физику падающего камня, отскакивающего мяча и т. п. самонадеянно экстраполировали [1] на планеты и молекулы газа.

---

[1] «Экстраполяция» означает использование известных сведений с целью сделать предположения, приближенные подсчеты относительно того, что находится или происходит за известной областью. Напротив, «интерполяция» означает приближенный подсчет внутри известной области. Если мы знаем время, когда поезд выходит из Бостона и когда он прибывает в Нью-Йорк, то мы можем с помощью интерполяции приближенно подсчитать, когда он проходит через Нью-Хэйвен; но чтобы оценить время его прибытия в Вашингтон, мы пользуемся экстраполяцией. Интерполяция безопасна — с достаточным количеством данных мы можем начертить надежный график и по нему вполне надежно получить промежуточную информацию. Экстраполяция рискованна — поезд может иметь конечную остановку в Филадельфии и совсем не прийти в Вашингтон! Однако большинство плодотворных предположений

НОВАЯ ФИЗИКА

Уверенность и полнота классической физики были опрокинуты в этом веке пятью великими достижениями:

1. С открытием электронов и радиоактивности была обнаружена *атомная структура*. Атомы можно разрушить, и они даже могут превращаться в другие атомы. *Возникла ядерная модель атома.*
2. *Теория относительности* разъяснила некоторые парадоксы и изменила наши представления о пространстве, времени, массе и полях.
3. Было обнаружено, что у света (и всех других видов излучений) энергия упакована в «снаряды», хотя распространяется он подобно волнам. *Возникла квантовая теория*. Это привело к модели атома Бора, который руководствовался своим принципом соответствия.
4. *Было обнаружено, что объекты атомной физики (электроны, ядра...) ведут себя и как волны, и как частицы*. Двойственное поведение «волна-частица», таким образом, оказалось свойственным и излучению, и частицам вещества. Это привело к новой теории, «квантовой механике», с важными философскими идеями принципа неопределенности и дополнительности.
5. Было открыто *множество новых субатомных частиц*: электроны, ядра, нейтроны, мезоны, нейтрино и недавно много других.

Из этих достижений указанное в пункте 1 было описано в предыдущей главе, указанное в пункте 2 — в гл. 31. Достижения, указанные в пунктах 3 и 4, обсуждаются в этой главе. Мы не будем касаться описания новейших частиц, указанных в пункте 5,— экспериментальное и теоретическое наступление на них продолжается, и нам остается с нетерпением ожидать решения существующих сегодня загадок ядерных сил и структуры ядер.

Атомная физика 1890—1915 гг.

В начале этого века «атомная физика» была юной наукой, быстро растущей на базе новых экспериментов с электричеством. Старая наука об электричестве и магнетизме была построена в прошлом веке, обеспечив последовательные знания о зарядах,

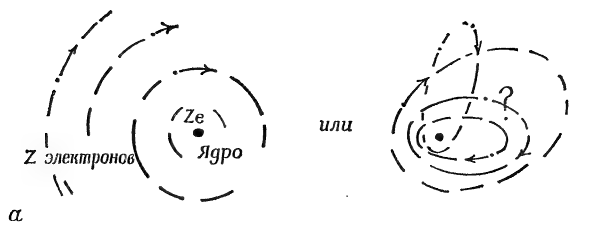
---

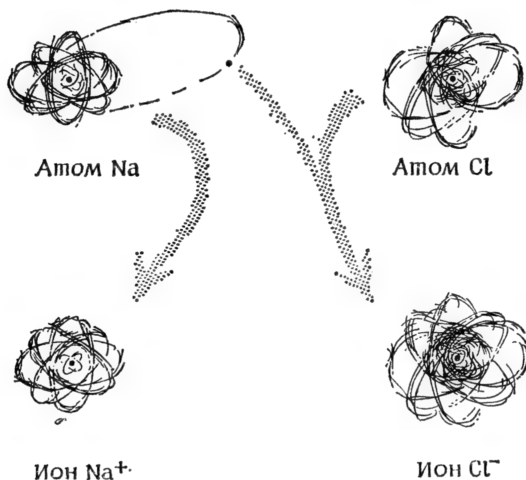
в науке делается с помощью мудрой экстраполяции, которую Джон А. Уилер назвал «daring conservatism»—«отважная осторожность». (Игра слов: «conservative» означает также «сдержанный», «умеренный», «осторожный».— *Прим. перев.*)

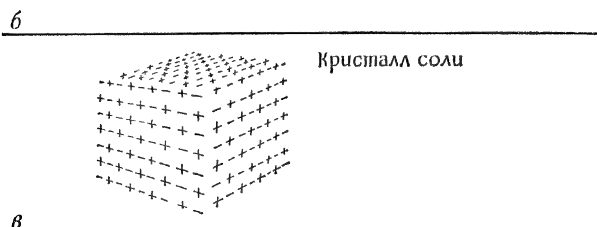
токах и полях. С практической стороны ученые и инженеры развили — посредством интерполяции — промышленное использование этой науки, создав электромоторы, измерительные приборы, лампы, силовые системы и линии связи. С теоретической стороны экспериментальные законы, объединенные в уравнениях Максвелла, логически привели к предсказанию радиоволн.

На грани веков радиоволны были получены с помощью электричества, хотя еще и не использовались, и было установлено, что свет представляет собой очень короткие радиоволны. Затем, когда картина казалась близкой к завершению, появились новые сведения об атомах и электронах сразу из нескольких различных источников: открытие рентгеновских лучей, радиоактивности, фотоэлектрического эффекта и эмиссии электронов из нагретых металлов; исследования ионов и электронов в разрядных трубках. Оказалось возможным расчленить атомы на положительные ионы и универсальные электроны с доступными измерению свойствами. В начале века была предложена и проверена картина внутренней структуры атомов.

В первой четверти этого века количество знаний об атомах увеличилось, но появились некоторые серьезные парадоксы. Резерфорд предложил хорошую теоретическую модель атома: малое по размерам массивное ядро окружено движущимися электронами подобно крошечной солнечной системе. Электроны все одинаковы, с массой, равной 1/1840 массы атома водорода, и с универсальным зарядом $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *к*. Ядро невероятно мало; его диаметр составляет 1/10 000 Å — атомной единицы длины. Ядра являются носителями положительного заряда, варьирующегося от $+e$ для ядра водорода (протона) до $+92\ e$ для ядра урана. Из заряда исходит электрическое поле, убывающее обратно пропорционально квадрату расстояния от заряда. Число Z единиц $+e$, содержащихся в заряде, дает «атомный номер» элемента и определяет его место в периодической системе химических элементов. Последнее объясняется тем, что Z дает также число электронов, окружающих ядро в нейтральном атоме. Эти электроны, сгруппированные по некоторой схеме в слои, или оболочки, отвечают за химические свойства. Атомы, которые теряют или приобретают электроны, становятся ионами — активными агентами во многих химических процессах. Электрические силы между положительно и отрицательно заряженными ионами связывают некоторые молекулы, например молекулу соли $Na^{+}—Cl^{-}$. В других химических соединениях, наоборот, электроны находятся в совместном владении атомов, вместо того чтобы быть переданными полностью какому-







Фиг. 171. Атомные картины.

а — атом Резерфорда; *б* — модели атома Бора; *в* — ионы в кристалле соли.

либо атому. *Все атомы и молекулы удерживаются электрическими силами*. У легчайших атомов (водород, гелий, литий...) их немногочисленные электроны находятся далеко от ядра, в огромной области пространства [1], где действует поле, подчиняющееся закону обратных квадратов. Наиболее тяжелые атомы (золото, уран и т. д.), с числом электронов, близким к сотне, удерживают эти электроны в нескольких слоях. *Самые внутренние* группы (остающиеся все еще далеко от ядра) сильно связаны электрическим полем большого заряда ядра, и обычные химические действия на них не влияют. Однако их можно разрушить при бомбардировке электронами большой энергии, фотонами рентгеновских лучей и т. п.

Только *самые внешние* группы электронов участвуют в химических превращениях. Для этих электронов притяжение к ядру в значительной степени нейтрализовано отталкиванием от более внутренних электронов, оказывающих «экранирующее» действие. Поэтому самые внешние электроны слабо связаны и легко обмениваются или обобществляются, создавая силы, объединяющие атомы в химических соединениях, и поля, которые запасают «химическую энергию». Данные химии наводят на мысль о том, что только несколько электронов принадлежит к этой наиболее внешней группе, и более поздняя теория Бора в деталях подтвердила картину: один электрон в водороде, натрии, калии и других металлах, которые, теряя его, образуют положительно заряженные ионы («+» ионы); 2 в меди и других металлах, которые образуют «++» ионы; 3 — в алюминии... В хлоре самая внешняя группа содержит 7 электронов и может захватить еще один, чтобы образовать компактную стабильную группу из восьми электронов и превратить атом в ион Cl^-, электронная структура которого подобна структуре нейтрального атома аргона. (Именно поэтому натрий так легко соединяется с хлором, образуя соль, в которой атомы остаются ионизованными даже в твердом кристалле.) Кроме этих предположений, следующих из данных химии, ясной схемы пространственного распределения электронов не было. И резерфордовская модель оставляла нерешенным неприятный парадокс: вращающиеся по окружности электроны должны были бы излучать электромагнитные волны [2] и двигаться по свертывающейся

---

[1] Здесь нет вещества, но, вообще говоря, эта область пространства заполнена энергией — потенциальной энергией электрического поля ядра.

[2] В современных кольцевых ускорителях электроны, мчащиеся по огромным круговым орбитам, не только «должны», но и действительно излучают, что приводит к огромным издержкам затраченной энергии.

спирали все быстрее и быстрее — инфракрасный свет, затем красный, зеленый, ..., ультрафиолет, ..., рентгеновские лучи, ...,— что привело бы к быстрому разрушению атома. Ясно, что на самом деле атомы *не* разрушаются подобным образом. Мы не видим таких «сгорающих» атомов, а, напротив, обнаруживаем, что они стабильны. Почему?

Кое-что было известно о структуре самих ядер. Радиоактивные элементы испускают α-, β- и γ-лучи с такой энергией, которая свидетельствует об их ядерном происхождении. Масс-спектрографы показали, что ядерные массы представляются почти целыми числами, умноженными на массу протона. Поэтому теории *ядерной* структуры исходили из представления о компактной группе протонов и электронов, удерживаемых вместе специальными силами. Теперь мы видим, что модель была неудобной: электроны настолько легки, что их длина волны слишком велика для того, чтобы поместиться внутри измеренных предельных размеров ядра. Кроме того, существовала проблема сохранения спина. С открытием нейтрона были предложены более подходящие компоненты ядер. Теперь стали считать, что они состоят из протонов и нейтронов [1], каким-то образом очень сильно связанных.

При распаде радиоактивного атома выделяется огромное количество энергии, которое можно точно измерить. Но для данного одиночного радиоактивного атома нельзя предсказать точно время, которое он проживет до распада. Мы можем указать только вероятностную величину, такую, как период полураспада для большого количества атомов. Понаблюдайте за счетчиком Гейгера, регистрирующим альфа-частицу,— вы увидите, что альфа-частицы появляются в произвольные моменты времени совершенно случайно, подобно каплям дождя на жестяной крыше. К началу 1900-х годов физики уже обращались к статистической точке зрения по другим поводам. Она была хорошо проверена в кинетической теории,

---

[1] *Можно* считать, что сам нейтрон состоит из протона, электрона и нейтрино — на такие продукты распадается *свободный* нейтрон. Но если мы исследуем структуру нейтрона *внутри ядра*, у него обнаруживаются иные свойства. Он ведет себя подобно одной частице или, может быть, подобно протону, тесно связанному с мезоном,— можно снова представить, что такая система испускает электрон и нейтрино. С этой последней точки зрения можно сказать, что все ядра и фактически все вещество «сделаны» из протонов, электронов и нейтрино с электронами в ядре, связанными в частице, называемой нейтроном; мезоны действуют как ядерный «известковый раствор». Однако при проникновении внутрь ядра представление о «реально» существующих здесь электронах уводит нас слишком далеко от наблюдаемых электронов, обладающих размерами того же порядка, что и ядро.

где было видно, что регулярные характеристики и свойства, такие, как постоянное давление газа, устойчивый поток газа, ..., закон Бойля, ..., являются статистическими средними, характеризующими огромное скопление молекул. Теперь оказалось, что вероятность определяет распад радиоактивных ядер, бегство альфа-частиц из ядерной толчеи. Каким образом большинство ядер постоянно остается в виде целого, в то время как другие взрываются совершенно случайно? Этот вопрос адресован новой точке зрения, новой теории.

Относительность, 1905 г.

Тем временем была развита и принята на вооружение теория относительности. С философской стороны она проповедовалась как реформирующее учение: нельзя наделять картину природы деталями, которые нельзя проверить. *Нельзя даже задавать вопросы, которые предполагают существование таких деталей.* (Например, нельзя наделять электроны ненаблюдаемыми свойствами, спрашивая, какого они цвета, или изображая для них отчетливые орбиты.) С собственно физической стороны теория относительности предсказала различные эффекты и явления, наблюдаемые в опытах с движущимися объектами. Вот некоторые из них:

I. Покоящийся (или движущийся мимо объекта) наблюдатель обнаружит у движущегося объекта увеличенную массу m, большую, чем его «масса покоя» m_0. Эта масса m будет расти с увеличением скорости, стремясь к бесконечности при приближении скорости объекта к скорости света. Следовательно, никакие *материальные объекты* нельзя ускорить настолько, чтобы они двигались быстрее света, поскольку для этого потребовалась бы бесконечная сила.

II. С любого вида энергией связана масса, величина которой равна энергии, деленной на квадрат скорости света: $m=E/c^2$.

III. Следует считать, что любое тело массы m обладает полной энергией mc^2. (Эта величина включает кинетическую энергию тела и его «энергию покоя» m_0c^2, связанную с его внутренней структурой.)

IV. Прошедшее, настоящее и будущее не всегда абсолютно разделены. Движущиеся по-разному наблюдатели будут делать разные заключения о некоторых событиях (далеко разделенных в пространстве или очень близких во времени). Один наблюдатель может обнаружить, что события P и Q произошли одновременно, другой наблюдатель, движущийся с иной

скоростью, может увидеть, что Q произошло раньше P, а третий наблюдатель знает, что P произошло раньше Q. Таким образом, теория относительности предостерегает нас от самоуверенного обращения с *причиной* и *следствием* [1].

V. Все наблюдатели, как бы они ни двигались, при измерении получат одну и ту же величину скорости света — движение к источнику или от него никак не повлияет на результат измерения. Это было исходным предположением, из которого были выведены правила теории относительности. Теперь мы обобщим его в более широкое требование ко всем измерениям, а именно: ВСЕ ЗАКОНЫ ФИЗИКИ ИМЕЮТ ОДИНАКОВУЮ *ФОРМУ* ДЛЯ ВСЕХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ, НЕЗАВИСИМО ОТ ИХ ДВИЖЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ПРОИСХОДЯЩЕГО В ПРИРОДЕ СОБЫТИЯ [2].

Модели

В начале этого века стало выясняться, что при построении «моделей» природы, будь то крошечные атомы или огромные звездные галактики, были сделаны очень далеко идущие предположения. Зная правила, выведенные из экспериментов, масштаб которых сравним с размерами человека [3], мы рискнули предположить, что они справедливы для атомов. Мы применили макроскопическую физику к микроскопической природе. Мы интерпретировали микроскопическую природу на языке макроскопических механизмов — ускоряющихся платформ, летающих бейсбольных мячей и т. п. До тех пор, пока модель была *плодотворной* — давала

---

[1] Здесь автор допускает неточность: высказанные в п. IV утверждения о событиях P и Q справедливы лишь в том случае, если они не связаны причинно-следственной связью. Это ясно хотя бы из того, что один из наблюдателей видит события происшедшими одновременно в разных точках пространства.— *Прим. перев.*

[2] Здесь имеется в виду движение с постоянной по величине и направлению скоростью. Обобщением этих положений на случаи движения наблюдателей с переменной скоростью занимается общая теория относительности, существенно связанная с теорией гравитации.— *Прим. перев.*

[3] Филипп Моррисон указывал, что вещи, с которыми люди работают и которые они делают, приходятся на узкую область масштабов. Самый большой небоскреб лишь в 300 раз выше человека. Если мы попытаемся построить небоскреб высотой в 3000 человек, наши материалы не выдержат, если только не сделать его в форме горы. Шарик из шариковой ручки составляет около 1/3000 ширины человека. Мы (достаточно) опрометчивы для того, чтобы предполагать, что наши непосредственные экспериментальные правила распространяются на звезды, удаленные на расстояние в 3 000 000 000 000 000 человек, или на электроны — в область размером 1/300 000 000 000 000 ширины человека.

понятную интерпретацию результатов предложенных экспериментов и подтверждалась результатами различных опытов,— она была хорошей. Но после предупреждения теории относительности, прозвонившего ученым прямо в уши, они стали гораздо более осторожными в высказываниях о справедливости своих моделей. Их студенты были склонны считать, что модель объясняет причину, но наиболее мыслящие из них не раз останавливались при попытке объяснить почему («мы знаем из нашей модели, что это происходит *потому*, что...»), предпочитая говорить, что («в рамках нашей модели это выглядит подобно... и, возможно, мы увидели бы в эксперименте, будет ли...»). Это старый урок, никогда полностью не выученный — если бы это случилось, ученые впали бы из легковерного восхваления в сверхосторожное отрицание,— но уроку предстоит повторяться снова и снова. Как хорошему ученому вам следует быть подозрительным в отношении моделей. Но вы не должны рассматривать модели как нечто детское. Они играют важную роль в методах, которыми пользуется человеческий ум для познания и обучения. Когда наши чувства сообщают нам что-либо совершенно новое, мы прежде всего мысленно стремимся найти что-нибудь известное, что напоминает нам это новое. Мы очень прочно прикрепляем к новым вещам старые известные ярлыки и очень медленно склоняемся к новым взглядам [1]. Даже те способные современные ученые, которые наиболее громко призывают к операционалистским методам — «описывать все в терминах методов наблюдения»,— оставляют свое воображение свободным для моделей, когда они размышляют о новых разработках.

РАЗВИТИЕ КВАНТОВЫХ ИДЕЙ, 1900—1915 гг.

Традиционные модели в нескольких областях физики были опровергнуты открытиями, указывающими на странные свойства света и других видов излучений: *«порции» энергии*. Когда уже казалось установленным, что свет представляет собой электромагнитные волны, в экспериментах стали обнаруживать, что он также состоит из определенных малых порций энергии, подобных

[1] Психологи предлагают наблюдателю смотреть через глазок в деформированную комнату, построенную криво, со скошенными стенами и потолком, но раскрашенную так, чтобы создать перспективу и скрыть искажения. Нормальный наблюдатель считает в рамках известной ему модели, что он видит обычную неискаженную комнату. Затем, когда обычные люди входят в ком-

частицам. Это *квантовое* [1] представление возникло из нескольких парадоксальных противоречий между экспериментами и классической теорией [2].

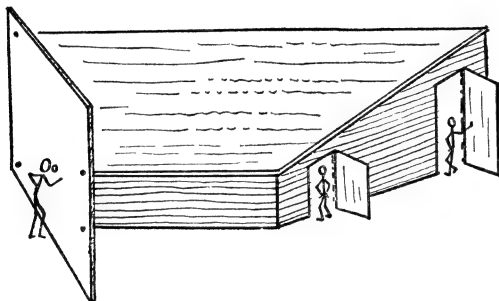
Оно разрешает конфликты одним правилом, модифицирующим классическую физику: *Любой обмен энергией между веществом и излучением происходит лишь определенными порциями энергии, «квантами». Для каждой порции или кванта*

ЭНЕРГИЯ = (УНИВЕРСАЛЬНАЯ ПОСТОЯННАЯ, h)·(ЧАСТОТА ИЗЛУЧЕНИЯ).

Таким образом, дискретны не только вещество и заряды, поделенные на части в виде атомов и электронных зарядов, но в определен-

---

нату в разных ее углах, он придерживается своей модели и утверждает, что эти люди — гиганты и карлики (фиг. 172).



Фиг. 172.

[1]) От латинского слова «quantum», обозначающего «сколько» или «как много». Это слово вообще обозначает часть, долю или разделенную порцию. В физике оно обозначает строго определенную порцию: «ровно столько, сколько получается по формуле».

[2]) Эта идея произвела настоящую революцию сначала в атомной физике, затем во всех основных областях физики и химии и, наконец, в философии науки. Однако это слишком длинная история, чтобы ее можно было рассказать здесь как следует. Потребовалось бы длительное обсуждение экспериментальных доказательств с использованием серьезного математического анализа. Потребовалось бы детальное рассмотрение волн; это включало бы математическое рассмотрение вероятностных распределений; и тогда аргументы привели бы вас к принятию нового взгляда на природу в атомных масштабах: с одной стороны, строгие «полицейские» правила квантовых ограничений, а с другой стороны, «система свободного предпринимательства», вероятностное поведение в атомном мире, рядом с которым ньютоновский детерминизм выглядит подобным рабству. Здесь мы лишь упомянем некоторые результаты. Мы даже не можем определенно адресовать вас к другим книгам. В элементарных книгах сообщается некоторая информация и констатируются правила. Фундаментальные книги настолько уснащены математикой, что к ним, по-видимому, требуются еще новые разъяснения.

ных важных обстоятельствах дискретна также и энергия. Наименьшей величины (атомной единицы) энергии не существует, но (для определенных форм энергии) у величины отношения энергии к частоте имеется универсальный «атом», или единица, h. Это квантовое ограничение выглядит безобидным — особенно для читателей, слышавших об этом раньше,— но оно вступает в противоречие с ньютоновской механикой, если ее применять к молекулам, атомам, электронам... :

1) Раскалите добела кусок черного металла так, чтобы он испускал интенсивный поток излучения: ультрафиолет+видимый свет++инфракрасное излучение+радиоволны. Общие соображения, основанные на ньютоновской механике, предсказывают, что больше всего энергии будет излучаться в области ультрафиолета (самая короткая длина волны, наибольшая частота). Но на самом деле это неверно. Термоэлемент, измеряющий интенсивность излучения, показывает, что максимум потока энергии приходится на середину спектра. Это противоречие было известно в 1900 г. и впервые привело к предположению о существовании квантового ограничения. При наложении этого ограничения механическая теория предсказывает наблюдаемый спектр.
2) Нагревайте твердый образец или газ и измеряйте удельную теплоемкость при различных температурах. Ньютоновская физика предсказывает, что при неизменных прочих условиях удельная теплоемкость остается постоянной, не зависит от температуры. Неверно. Измеренная величина удельной теплоемкости при изменении температуры от очень низкой до очень высокой растет от очень малой величины до величины, предсказываемой классической физикой. Квантовое ограничение предсказывает это (см. гл. 30).
3) Попадая на поверхность металла, свет может вырвать оттуда электроны. По классической механике мы представили бы, что приходящие на поверхность световые волны все сильней и сильней раскачивают электрон, «привязанный» к атому металла, до тех пор пока электрон не оторвется на свободу. С этой точки зрения, чтобы достаточно сильно раскачать электрон слабым светом, всегда необходима длительная выдержка; кроме того, очень сильный свет (большой интенсивности) может выбрасывать электроны с большей энергией. Неверно. Независимо от того, тусклый свет или яркий, электроны вылетают с одной и той же полной энергией. Этот «фотоэлектрический эффект» оказался легко поддающимся объяснению и расчету после того,

как Эйнштейн предположил, что энергия света упакована в «снаряды», порции.

4) Определенные экспериментальные свойства спектров кажутся странными с точки зрения классической физики. В последнем столетии были измерены и выражены простыми формулами интервалы между яркими линиями в спектре горящих газов. Классически их нельзя «объяснить». Аналогичные закономерности проявляются в крайней коротковолновой части спектров рентгеновских лучей. Бор показал, каким образом квантовая теория может дать хорошее объяснение этим фактам и обеспечить широкую область для дальнейшей интерпретации.

В следующих разделах более детально обсуждаются все эти вопросы, при решении которых были сформированы основы квантовой теории.

Спектр белого света

Раскалите добела кусок черного металла и проанализируйте его излучение. Еще лучше, разогрейте печку и позвольте излучению выходить через дырку в ее стенке. Вспомните, что хороший поглотитель должен быть и хорошим излучателем [гл. 26, задача 23, и гл. 4, опыты 6, ж) и з)]. Самый лучший излучатель — это абсолютно черное тело. Дырка в ящике является хорошим поглотителем: все, что попадает внутрь, будет отражаться там от стенки к стенке до тех пор, пока совсем не поглотится, — никакая черная краска на собачьей конуре не выглядит чернее открытой для собаки дверцы. Поэтому дырка должна быть абсолютным излучателем. Внутри печки излучение должно содержать полный набор волн, типичный для излучения «черного тела», а весь комплект содержащегося внутри набора выходит через дырку. Разложите излучение в спектр с помощью дифракционной решетки и измерьте с помощью зачерненного термоэлемента поток энергии в различных областях. График на фиг. 173 показывает результаты такого эксперимента.

Вспомните, что решетка разделяет свет на составляющие по длинам волн, и это разделение показывает, что у красного света длина волны примерно вдвое больше, чем у голубого.

Простую гармоническую волну характеризуют три величины:

I) длина волны, λ — расстояние от одного гребня до другого;

II) частота f — число полных длин волн, прошедших мимо наблюдателя в секунду, или число колебаний источника в секунду, или число колебаний любого датчика (в секунду), на который, проходя мимо него, действует волна;

III) скорость v, с которой перемещается профиль волны.

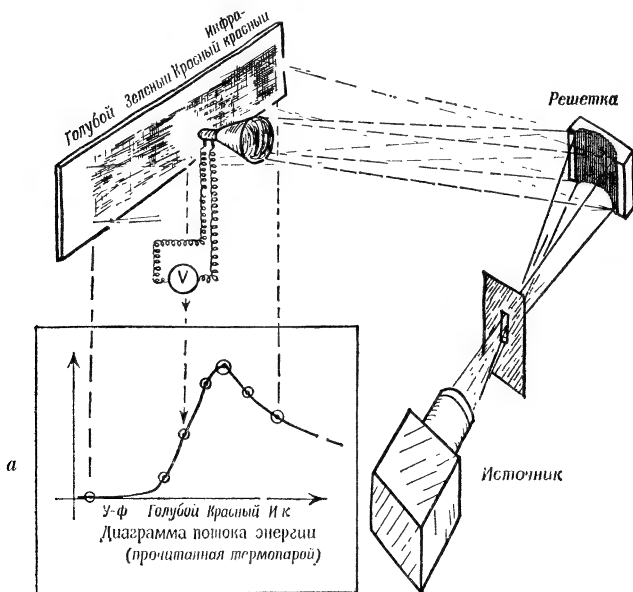
За 1 *сек* профиль волны смещается на расстояние v, а мимо исходной точки проходит f таких профилей длиной λ. Следовательно, $v = f\lambda$.

СКОРОСТЬ = ЧАСТОТА · (ДЛИНА ВОЛНЫ)

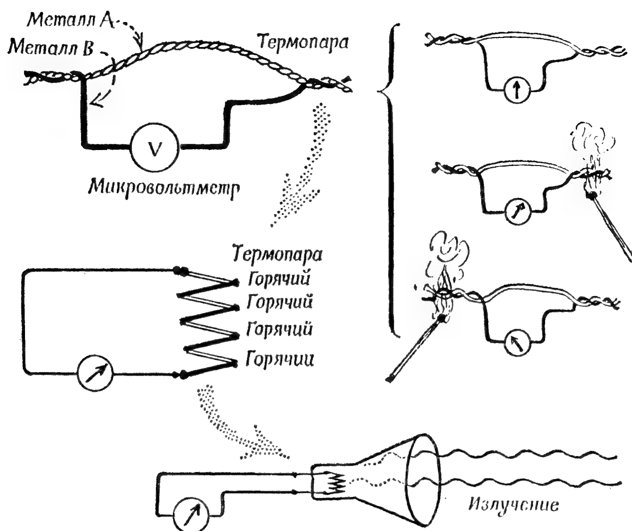
для любой периодической волны.

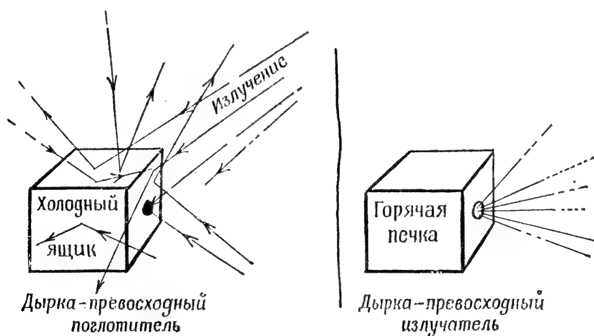
Для *света* в воздухе или вакууме v — универсальная величина $3 \cdot 10^8$ *м/сек*, которую мы обозначаем буквой c. Обозначим еще частоту через ν вместо f (ν — буква греческого алфавита, аналогичная русской «н», читается «ню»). Тогда $c = \nu\lambda$ и частота $\nu = c/\lambda$. Поскольку c — постоянная, *частота обратно пропорциональна длине волны.* Чем меньше длина волны, тем больше частота. Приведенная ниже таблица грубо показывает некоторые значения этих величин.

Цвет света	Длина волны (*в метрах*)	Частота (в колебаниях в 1 *сек*)
Ультрафиолетовый	$3\,000 \cdot 10^{-10}$ и меньше	$10 \cdot 10^{14}$ и выше до $30\,000 \times 10^{14}$ для рентгеновских лучей и γ-лучей
Фиолетовый	$4\,000 \cdot 10^{-10}$	$7{,}5 \cdot 10^{14}$
Зеленый	$5\,000 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{14}$
Красный	$7\,000 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{14}$
Инфракрасный	$10\,000 \cdot 10^{-10}$ и больше	$3 \cdot 10^{14}$ и меньше до 10^6 для длинных радиоволн



Фиг. 173. Энергетический спектр излучения.
а — экспериментальное устройство;





Фиг. 173 (продолжение)

б — детали термопары; в — дырка — превосходный излучатель типа «черного тела»

Обратимся к теории и посмотрим, что она предсказывает для такого графика, если исходить из знания других отраслей физики. Надежные термодинамические аргументы приводят к некоторым вполне определенным предсказаниям о полном излучении «черного тела» при различных температурах:

1. Закон Стефана:

$$\left(\begin{matrix}\text{ПОЛНЫЙ ПОТОК ЭНЕРГИИ}\\ \text{во всем спектре}\end{matrix}\right) \sim \left(\begin{matrix}\text{АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА}\\ \text{излучателя}\end{matrix}\right)^4,$$

или

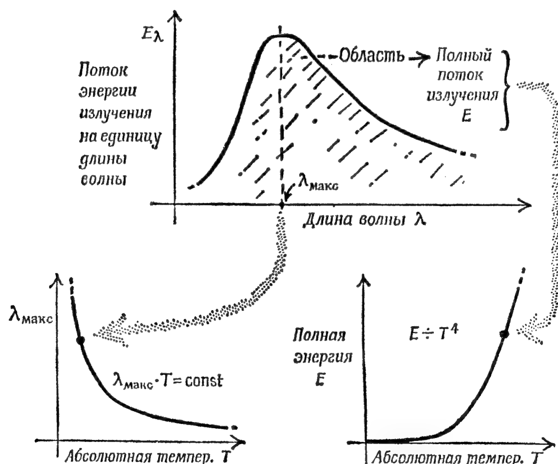
$$E \sim T^4.$$

2. Закон Вина:

Длина волны $\lambda_{\text{макс}}$, на которую приходится максимум графика, показывающего зависимость энергии излучения от длины волны, обратно пропорциональна абсолютной температуре, так что

$$\lambda_{\text{макс}} T = \text{const}.$$

Эксперименты подтверждают справедливость этих законов вплоть до наибольших энергий, которые можно измерить газовым термо-



Фиг. 174. Излучение (экспериментальные факты).

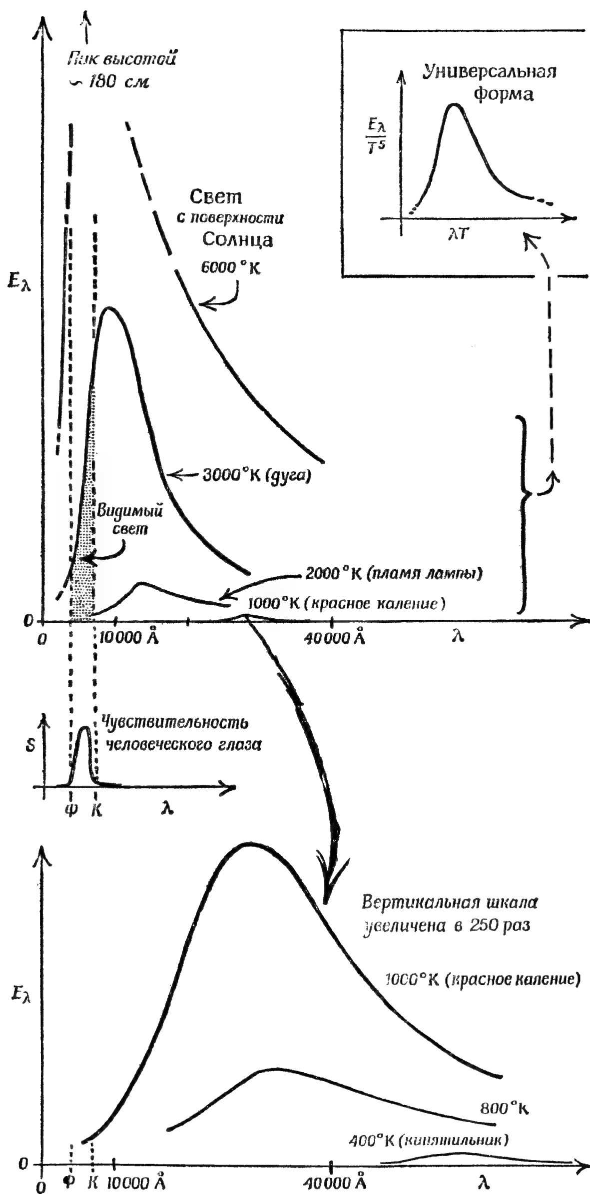
метром (фиг. 174). Мы доверяем обоим этим законам и используем их для того, чтобы оценивать температуру печки или Солнца и

звезд по шкале Кельвина. Оба закона дают одинаковую температуру *поверхности* Солнца примерно 6000° K.

Но дальнейшее рассмотрение на основе традиционной [1] (ньютоновской) механики предсказывает также детальную форму графика, и она оказывается совершенно неверной. Это предсказание в вопиющем противоречии с фактами гласит: обмен энергией внутри печки должен приводить к передаче энергии от любой длины волны к более короткой до тех пор, *пока практически вся энергия не окажется в ультрафиолете или еще дальше.* Таким образом, на предсказанном графике кривая стремится к бесконечности в области ультрафиолета. Разумеется, эта «ультрафиолетовая катастрофа» не наблюдается у реальных излучателей, от разогретого докрасна железа до ярко-белого Солнца. Они излучают тепло в виде оранжевого света вместо того, чтобы остывать из-за быстрой ультрафиолетовой вспышки. Физики делали повторные попытки вывести экспериментальное энергетическое распределение из обычной волновой теории, уравнений Максвелла и электронной теории. Всех постигала неудача: снова и снова предсказания хорошо совпадали с экспериментом на красном конце спектра, но на другом конце возникала ультрафиолетовая катастрофа. Тогда около 1900 г. немецкий физик Макс Планк подошел к проблеме с другой стороны и спросил, как Эйнштейн в теории относительности (исторически позже.— *Перев.*): как нужно минимально модифицировать теорию, чтобы согласовать ее с фактами? Он располагал только экспериментальной кривой, но не ее алгебраической формулой, поэтому и не мог с помощью логики найти точную модификацию. Вместо этого Планк обратился к догадкам и предположениям, как в свое время поступил Кеплер. После блестящего умозрительного анализа он нашел успешное правило. Планк заметил, что необходимо некоторое правило, которое бы оставляло красный свет практически неизменным, но подавляло фиолетовое и ультрафиолетовое излучение. Рассмотрим аналогичную задачу в большом

---

[1] Для этого нужно использовать законы Ньютона, из которых следует равномерное распределение энергии по всем степеням свободы, а также геометрию волн. Тогда расчеты+алгебра+геометрия после утомительной работы непреложно приведут к результату, противоречащему опыту. Схема рассуждений такова: представим себе волну, образующую систему стоячих волн, когда она зигзагами двигается внутри печки. Лишь некоторые длины волн могут подойти для того, чтобы образовать стационарную систему в ящике-печке, причем лучше, нежели длинные, для этого подойдут *более* короткие волны, еще лучше — волны очень короткой длины и т. д. При равномерном распределении энергии по степеням свободы *каждая* стоячая волна получает равную долю энергии излучения, и поэтому...



Фиг. 175. Излучение (экспериментальные факты).

Поток энергии из «абсолютно черного» излучателя при различных температур

бакалейном магазине. Как можно ограничить продажу каких-либо товаров, не повышая цены на них? Можно было бы продавать товары только большими партиями. Например, для распределения в семье денег на покупки не имеет особого значения, что рис, сахар и соль продаются не вразвес, а в пакетах по полкилограмма. Но если сахар упакован в неделимые мешки по 50 кг, то его будут покупать только те семьи, в которых есть сильные руки, большой автомобиль и другие ресурсы. Торговля сахаром в магазине почти прекратилась бы из-за ограничений, наложенных расфасовкой в слишком большие мешки.

Суть предположения Планка состоит в том, что энергия излучения упакована маленькими (атомных масштабов) порциями, так называемыми «квантами». Размер квантов не одинаков для разных цветов — они крошечные у инфракрасного. маленькие у зеленого и большие у ультрафиолетового излучения. Как повлияет такая упаковка на предсказываемый спектр излучения? Предположим, радиация выходит из дырки в печке, и рассмотрим обмен энергией между излучением и стенками внутри печки. Квантовые ограничения будут наиболее заметны для ультрафиолетового конца спектра, где кванты велики. Инфракрасный свет будет непрерывно изливаться обильным потоком крошечных квантов, слишком крошечных, хотя и многочисленных, чтобы повлиять на обмен энергией. Но ультрафиолетовый свет должен либо излучаться большими квантами, либо вовсе не излучаться. Голубое, фиолетовое и, особенно, ультрафиолетовое излучение будет существенно подавлено, и тем самым будет предотвращена ультрафиолетовая катастрофа Более детально правило Планка гласит:

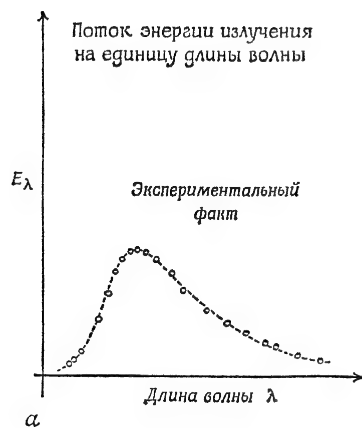
Излучение упаковано порциями («*кванты*»).

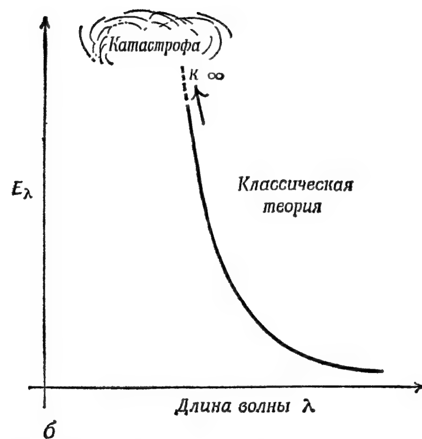
В век атомов вещества, атомов электричества — это естественное предположение, которое следует попытаться проверить.

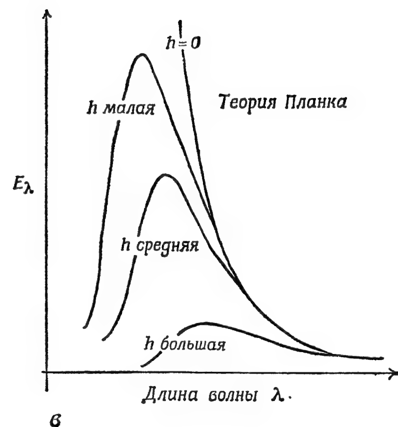
Каждый квант состоит из излучения единственной частоты (и, следовательно, единственной длины волны, т. е. из света «одного цвета» — из *монохроматического излучения*).

Правило, определяющее размеры квантов:

ЭНЕРГИЯ КВАНТА ПРОПОРЦИОНАЛЬНА ЧАСТОТЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДАННОМ КВАНТЕ, или ЭНЕРГИЯ $= h$ ЧАСТОТА, или $E = h\nu$ (и, следовательно, $E \sim 1/\lambda$), где h — универсальная постоянная (теперь ее называют постоянной Планка), а ν, как обычно, частота излучения.







Фиг. 176. Излучение (факты и теория).

Исходя из этого, Планк предсказал распределение энергии в излучении черного тела. Его предсказание совпадает с экспериментальным графиком как в области ультрафиолета, так и в остальных частях спектра. В инфракрасной области формула Планка приводит к традиционным, известным раньше предсказаниям, совпадавшим здесь с экспериментом. Так что это было замечательное предположение для всех областей. Разумеется, оно привело к согласию с экспериментом; в противном случае Планку, как в свое время Кеплеру, пришлось бы выдвигать другие гипотезы. Поразительно, что то же самое правило разрешает и другие, казалось бы, совершенно иные парадоксы.

Значение квантовой постоянной *h*

Универсальная постоянная h в единицах СИ равна $6{,}62 \cdot 10^{-34}$. Поскольку h=(ЭНЕРГИЯ КВАНТА)/ЧАСТОТА, то его размерность *дж/сек*$^{-1}$, или *дж·сек*. Таким образом,

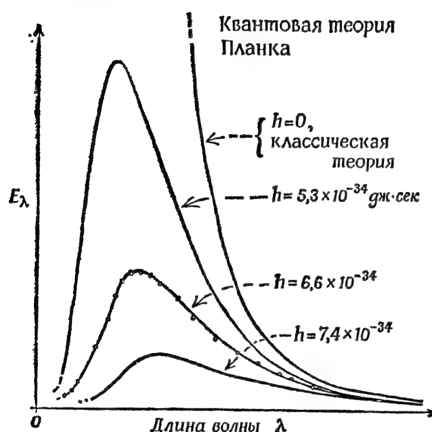
$$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34} \text{ дж} \cdot \text{сек}.$$

Планк не угадывал этой величины; она получилась из сравнения с экспериментом. Планк изменял картину излучения от гладкого, непрерывного потока, подобного струе воздуха, до зернистого, подобного струе песка. При большей выбранной величине h и все «песчинки» должны быть бóльшими, а чем больше зернистость, тем больше она ощущалась бы. Если величина h равна нулю, то все «песчинки» слишком малы для проявления, и тогда получается обычное предсказание ультрафиолетовой катастрофы. Если h очень велика, то «песчинки» короткой длины волны должны быть слишком большими, так что их не смогут создать атомы обычной печки, и тогда ультрафиолета вообще не было бы, если только температура не слишком высока. При некоторой промежуточной величине h предсказания прекрасно согласуются с фактами. Подбором получается величина $6{,}6 \cdot 10^{-34}$ *дж·сек*.

Величина квантов

Квантовое правило $E = h\nu$ расфасовывает зеленый свет по маленьким порциям энергии, величиной около 2,5 *эв*. У красного света — бóльшая длина волны (мéньшая частота) и меньшие кванты, 1,8 *эв*. Кванты голубого света — бóльшие, 3 *эв*. Это крошечные порции: посмотрите на зажженную свечу в другом конце комнаты, и в ваш глаз будет попадать в секунду

около 10 000 000 000 квантов видимого света. При моментальном снимке в фотоаппарате используется примерно 1 000 000 000 000 квантов. Однако десяток голубых квантов может создать пометку на фотопленке, а человеческий глаз настолько чувствителен к ним, что нервы в его сетчатке реагируют чуть ли не на одиночный квант. Продолжая рассмотрение за границы видимой части спектра, мы обнаруживаем инфракрасное излучение, распределенное по



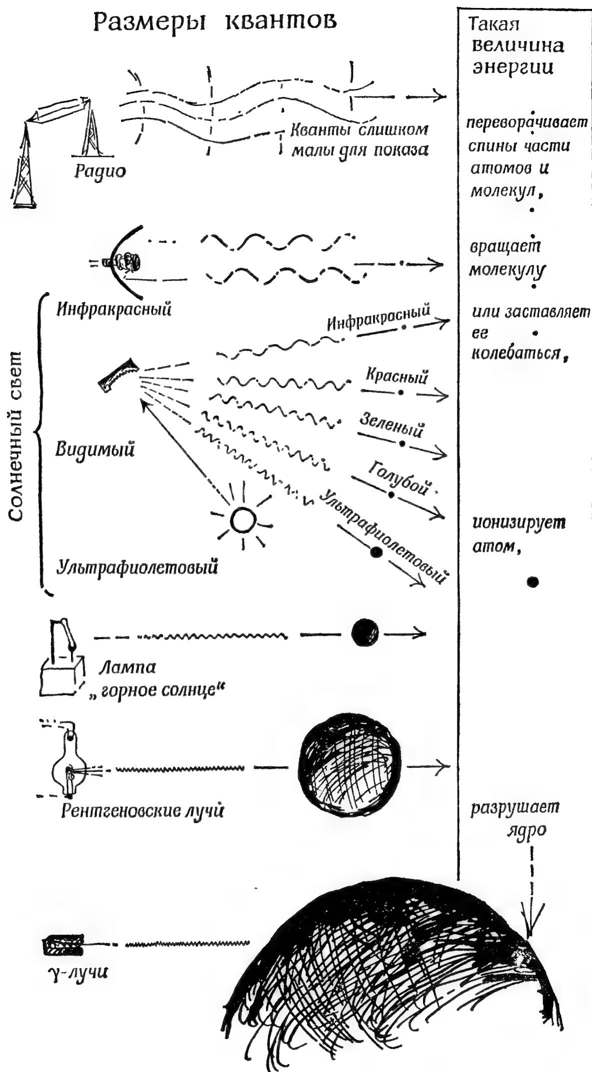
Фиг. 177. Теория излучения (подгонка теории Планка к экспериментальным фактам выбором h).

очень малым порциям энергии, и радиоволны в настолько маленьких порциях, что вряд ли можно надеяться непосредственно заметить действие (удары) отдельных квантов — но они ясно обнаружены непрямыми экспериментами, где они переворачивают спин атома.

С другой стороны, ультрафиолетовый свет распространяется большими квантами (что-нибудь около 12 *эв*), рентгеновские лучи излучаются огромными квантами (такими, как 50 000 *эв*), а γ-лучи — вообще гигантскими квантами (до 10^6 *эв* и больше). Поглощение одного большого кванта может изменить ген наследственности в живой клетке и даже убить клетку.

Квантовая революция

Может показаться: не слишком ли много беспокойства из-за единственного расхождения между теорией и экспериментом? Но это расхождение было жизненно важным, поскольку относилось к спектру излучения каждого нагретого тела (от парового котла



Фиг. 178. Величина кванта энергии.
Объем изображенного шара показывает энергию одного кванта.

до звезд) и показывало, что в теории, скомбинированной из механики, волновой теории света и электронной теории, что-то совершенно неверно. Хотя недостаток был обнаружен макроскопическими экспериментами, Планк проследил его происхождение до атомных масштабов: атомы испускают и поглощают свет атомными порциями энергии (и, по-видимому, он так и должен распространяться).

Ученые консервативны: они отнюдь не стали сразу приветствовать революционные изменения теории, а, напротив, упорно держались за свои старые взгляды как за жизненные принципы. Многих шокировала идея о том, что излучение состоит из «пуль», и они сомневались в том, что правило Планка $E=h\nu$ дает адекватное и необходимое описание природы. Тогда Эйнштейн защитил правило Планка от враждебного отношения, показав, что оно объясняет также и другие загадки: изменение удельной теплоемкости с температурой и фотоэлектрический эффект. А Пуанкаре дал общее математическое доказательство того, что если требовать согласия с экспериментальными фактами, то излучение *должно* обладать определенной дискретной упаковкой. Сегодня имеется так много экспериментальных доказательств существования энергетических порций в излучении, что все принимают квантовую точку зрения. Но на многие годы осталась основная загадка: *каким образом излучение может быть одновременно и непрерывным потоком волн и градом «пуль»?*

Удельная теплоемкость[1]

Измеренная удельная теплоемкость простых твердых тел и газов не согласуется с предсказаниями кинетической теории. Эйнштейн и другие авторы попытались применить квантовое ограничение $E=h\nu$ к тепловой энергии, которая заключена в *колеба-*

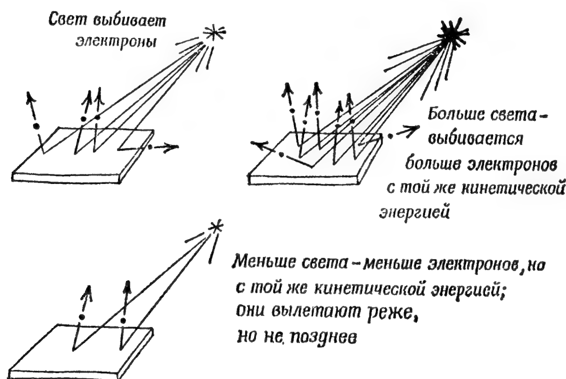
---

[1] См. гл. 27 и 30. Удельная теплоемкость — это относительная величина. Она показывает, сколько требуется тепла, чтобы нагреть образец вещества, в сравнении с количеством тепла, необходимым для такого же нагревания такой же массы воды. Численно— это количество тепла в килокалориях, необходимое для увеличения температуры 1 *кг* вещества на 1° С. Квантовое ограничение должно сказываться при очень низких температурах: среднее количество тепла, приходящееся на каждую степень свободы одного атома, очень мало. Энергия атома, обладающего квантом некоторого повторяющегося движения, будет при этом много больше средней, поэтому очень малое количество атомов будет иметь такие кванты. *Этот тип движения практически должен отсутствовать*, что приводит к неожиданно малой удельной теплоемкости.

ниях атомов и *вращении* молекул. Результат: превосходное согласие с экспериментом. Таким образом, квантовое правило распространяется не только на излучение, но и на другие явления: на любое *периодическое* движение (такое, как колебание или вращение), имеющее определенную частоту. (Кинетическая энергия свободного поступательного движения осталась неквантованной, см. гл. 30.)

Фотоэлектрический эффект

Своего объяснения ожидало от квантовой теории еще одно парадоксальное явление; связанные с ним экспериментальные факты как бы кричали: «Кванты!» Речь идет о *фотоэлектрическом эффекте*, который в наши дни используется в электронном «зрении» и который, видимо, всегда, хотя и в более сложной форме, использовался в наших собственных глазах. Луч света, падающий на чистый металл, может выбивать из него электроны. Слабый свет выбивает электроны с той же кинетической энергией, что и яркий свет, но просто их число оказывается меньшим. Даже если свет настолько слаб, что вылетают одиночные электроны через минуту или еще реже, все равно они имеют ту же самую скорость. И каким бы слабым ни был свет, электрон никогда не ждет до тех пор, пока он наберет достаточно энергии от столь слабого постоянного потока: иногда он вылетает с полной скоростью *сразу*, как только будет включен свет; в других случаях он может ждать

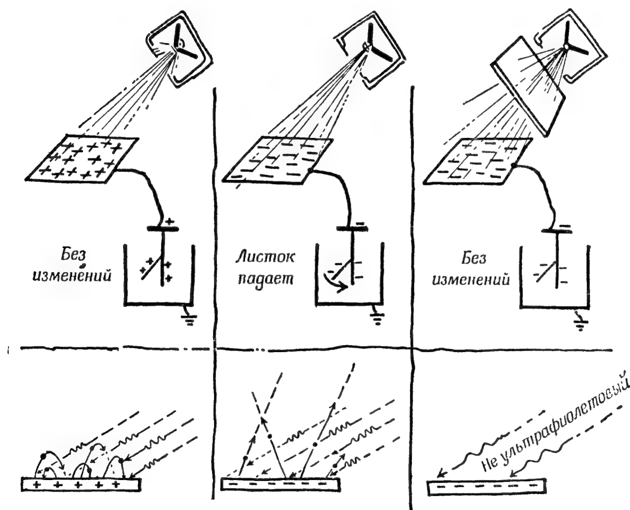


Фиг. 179. Фотоэлектрический эффект.

дольше, чем в среднем это нужно,— и все происходит совершенно случайно. Такого поведения нельзя ожидать, если непрерывный поток волн раскачивает электрон вверх — вниз до тех пор, пока не разорвет его связи,— подобно ребенку в ванне, создающему колебания воды, приводящие к выплескиванию ее через край. Наблюдаемое поведение электронов соответствует скорее свету, излучаемому порциями, подобными кусочкам динамита. Это наиболее прямое подтверждение существования квантов — «зерен» света.

ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ОПЫТ I

Соедините с электроскопом лист чистого цинка, сообщите ему положительный заряд и направьте на него луч белого света. Ничего не произойдет. Повторите то же самое, сообщив цинку отрицательный заряд. ультрафиолетовый свет — это существенный фактор; утечка заряда происходит из-за того, что электроны выходят, или, лучше сказать, выбиваются под действием ультрафиолета и затем удаляются под



Фиг. 180. Демонстрация фотоэлектрического эффекта.

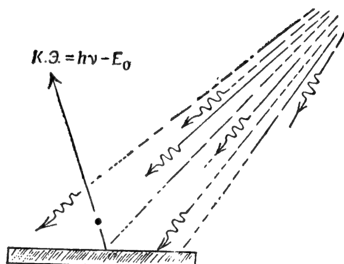
Листочки электроскопа опадают: под действием света цинк теряет отрицательно заряженные электроны. Поставьте на пути света лист стекла— заряды больше не будут утекать. Более сложные опыты утверждают: влиянием электрического поля заряженной пластины. Если пластина заряжена положительно, то электроны тоже могут быть выбиты, но поле пластины возвращает их обратно. Этот демонстрационный опыт

показывает лишь грубые черты эффекта — зернистость света не заметна, если только не использовать очень слабый свет. Но тогда при выбивании одиночных электронов необходимо очень большое усиление (для возможности регистрации эффекта).

ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ОПЫТ 11

Направьте слабый свет на счетчик Гейгера с прозрачным окошком в его трубке (или дайте возможность попадать туда рентгеновским лучам из удаленного источника). Счетчик будет срабатывать при «вспышке» ионов, порожденной каждым электроном, который выбивается из газа в трубке,— но чтобы эта демонстрация была убедительной, необходимо сделать ее значительно более утонченной.

Фотоэлектроны и цвет света. Частицы, вылетающие с освещенной пластины в вакууме, можно исследовать с помощью электрических и магнитных полей. Оказывается, это обычные электроны с энергией в несколько электронвольт. У натрия и некоторых других металлов эффект вызывается видимым светом, и эти металлы



Фиг. 181. Фотоэлектрический эффект: описание механизма, предложенное Эйнштейном.

используются в устройствах типа «электронного глаза». У большей части металлов эффект вызывается ультрафиолетовым излучением. Если использовать свет достаточно короткой длины волны, эффект обнаруживается на *всех* веществах.

Для любого определенного металла и одноцветного света все электроны получают одну и ту же энергию [1] (она равна стандартной энергии, характерной для данного цвета, за вычетом стандартного «налога», выплаченного в виде энергии, за выход

[1] В реальных экспериментах электроны распределены по скоростям от определенного максимума до нуля; ясно, что скорость электронов, выбитых из глубины пластинки, меньше, поскольку они должны преодолевать сопротивление, проходя мимо других атомов.

электрона из металла). Вывод: свет переносит свою энергию стандартными порциями (пакетами).

Размеры энергетических пакетов для разных цветов должны быть различными. При использовании голубого света энергия появляющихся фотоэлектронов больше, чем при использовании зеленого света; красный свет в большинстве случаев слишком «беден», чтобы внести плату за выход электрона. Ультрафиолетовый свет извлекает электроны с большей энергией, нежели видимый свет. Рентгеновские и γ-лучи дают еще более сильный эффект: они выбивают электроны из любого вещества, хотя часто проходят в веществе длинный путь, прежде чем выберут для этого какой-либо электрон. На снимке в камере Вильсона показаны треки таких «фотоэлектронов», выбитых из молекул воздуха рентгеновскими лучами (см. фиг. 49). Все треки показывают электроны одной и той же энергии — рентгеновские лучи также «зернисты».

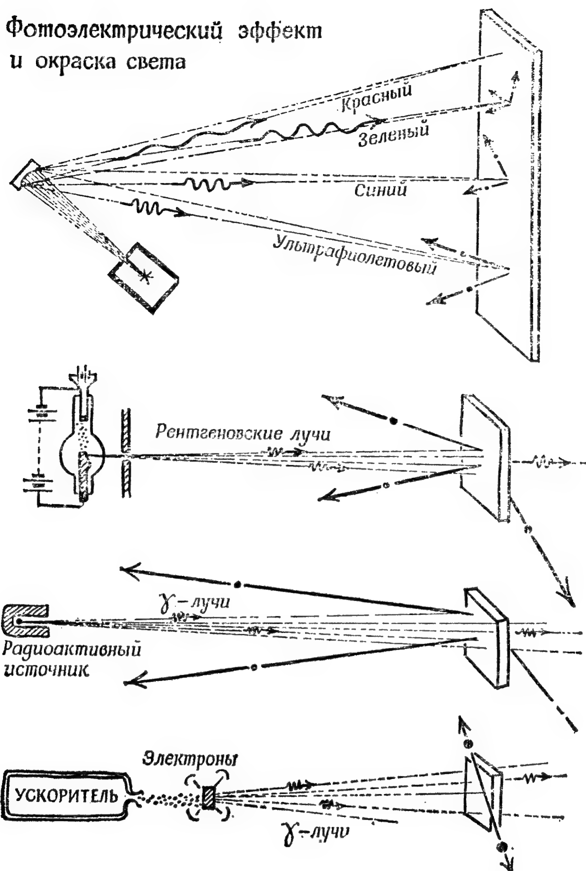
Для классической физики такое поведение кажется очень странным. Это примерно так же, как если бы океанские волны, входя в гавань, не могли раскачать корабли, стоящие здесь на якоре, но после того как некоторое время ничего не происходило, один корабль вдруг подпрыгнул бы на 100 *м* в воздух; снова штиль, потом другой корабль... тоже на 100 *м*. Вскоре стало ясно, что фотоэффект не может быть спусковым механизмом, в котором свет

> «освобождает электроны, уже снабженные энергией их будущего движения, поскольку ее величина определяется цветом света. *Кто заказывает музыку, тот и должен расплачиваться с музыкантом.* Но классическая теория не дает свету такого кармана, из которого он мог бы расплатиться» [1].

Фотоэлектрический эффект продолжал оставаться загадкой до тех пор, пока Эйнштейн не применил к нему квантовую теорию. Пусть энергия падающего света поступает квантами. Один электрон получает целый квант энергии, частично выплачивает ее за то, чтобы ускользнуть от собственного и соседних атомов, и вылетает с остатком (кванта энергии) в виде кинетической энергии. Предположим, что энергия, необходимая для освобождения электрона, равна E_0 — это «налог за выход», подобный «налогу» за испарение молекулы из жидкости. Тогда квант света может выбить

---

[1] A. S. Eddington, The Nature of the Physical World, Cambridge Univ. Press, 1928). В этой книге дано превосходное обсуждение с полезными аналогиями теории «копилки» в сравнении с теорией «крупной ставки» (в фотоэффекте).



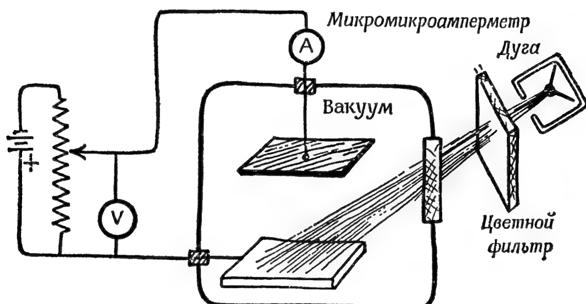
Фиг. 182. Фотоэлектрический эффект и окраска света.

Красный свет не может выбить ни одного электрона почти ни из какой поверхности; голубой свет выбивает из некоторых металлов электроны с малой кинетической энергией; ультрафиолетовый свет выбивает электроны с большей кинетической энергией; рентгеновские лучи и γ-лучи выбивают электроны из любого материала с еще большей кинетической энергией. А γ-лучи высокой энергии могут даже отрывать нуклоны от ядер (фоторасщепление).

электрон, если энергия кванта E больше, чем E_0. Вылетающему электрону остается

$$\text{кинетическая энергия} = E - E_0 = h\nu - E_0.$$

С этой точки зрения для одноцветного света все фотоэлектроны должны иметь одну и ту же энергию. Для большинства материалов величина E_0 больше, чем энергия кванта у голубого света, и лишь у ультрафиолетового и рентгеновского излучения энергия кванта может превысить E_0.



Фиг. 183. Фотоэлектрический эффект и цвет света; аппаратура для измерений.

Для проверки предложенного Эйнштейном соотношения приложим к собирающей пластинке тормозящее электрическое поле, достаточное для того, чтобы электроны, в отсутствие поля достигающие этой пластины, останавливались вблизи нее. Если для этого достаточно разности потенциалов в V *в*, то выбитые электроны должны были иметь кинетическую энергию (V *в*)·(e *кулон*), или Ve *дж*. Поэтому Ve должно быть равно $h\nu - E_0 (Ve = h\nu - E_0)$. График зависимости тормозящего напряжения V от частоты ν, полученный при использовании света нескольких различных цветов, должен быть *прямой линией*. Тангенс угла наклона этой прямой должен быть равен

$$\frac{h}{e}, \text{ т. е. } \frac{\text{постоянная Планка}}{\text{заряд электрона}}.$$

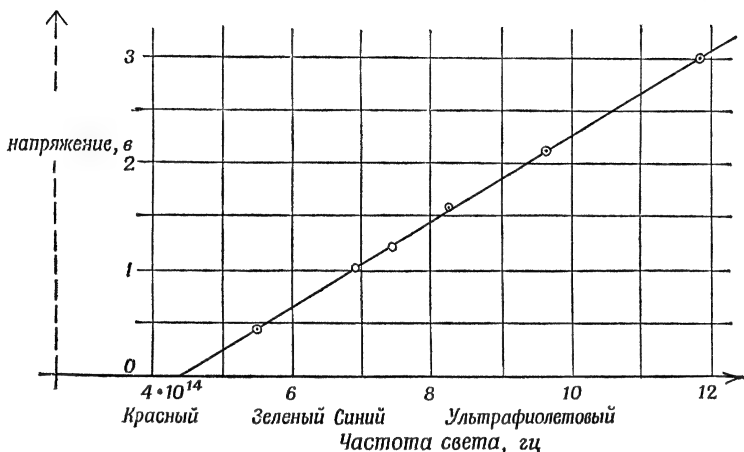
Задача 1

По-видимому, вы заметили, что раньше в этом курсе использование слова «должен» осуждалось. («Ученые говорят о том, что происходит фактически, а не о том, что должно...») Как вы расцениваете с этой точки зрения использование чуть выше слова «должен» (причем дважды)?

Задача 2

Покажите математически, что тангенс угла наклона должен быть равен h/e.

Милликен провел тщательные измерения с фотоэлектронами из натрия и других веществ. Чтобы уменьшить помехи от различных загрязнений, он обрабатывал *в вакууме* поверхность чистого металла на маленьком токарном станке с выведенным наружу



Фиг. 184. Фотоэлектрический эффект: измерения Милликена (к задаче 3).

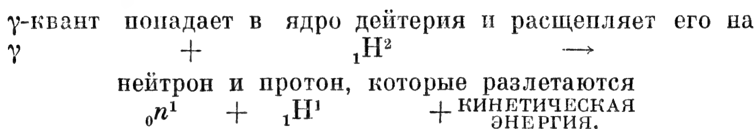
магнитным управлением! Он не только проверил предсказание Эйнштейна, но даже измерил величину h/e и получил значение h, согласующееся с величиной, которую Планк получил другим путем.

Задача 3. Фотоэлектрический эффект и квантовая постоянная

Измерения Милликена показаны на фиг. 184 [Physical Review, **VII**, 362 (1916)]. *Оцените с помощью этого графика квантовую постоянную h, если известно, что $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ кулон. Частота света для различных использованных им цветов дана в герцах и вычислена по отношению скорости света к длине волны, которая в свою очередь измерена с помощью дифракционной решетки. Разность потенциалов, указанная на графике,— это наименьшее тормозящее напряжение, которого достаточно для того, чтобы предотвратить попадание на коллектор электронов, выбитых светом. (При нахождении этой разности потенциалов из измеренных им величин Милликен учитывал «э. д. с. батареи»,*

созданной двумя различными металлами, которые были использованы в качестве фотоэлектрической поверхности и коллектора, но это не влияет на наклон графика.)

Соотношение Эйнштейна остается справедливым также для ультрафиолета, рентгеновских и γ-лучей, равно как и для всех веществ. Таким образом, фотоэлектрический эффект ясно обнаруживает квантовые свойства излучения. Видимый свет в лучшем случае лишь слегка щелкает по электронам, ультрафиолетовый свет их выбрасывает, рентгеновские лучи вышвыривают их, а γ-лучи выбивают их прямо-таки, как ударом хлыста. А у γ-лучей очень короткой длины волны кванты настолько велики, что они могут разбить ядро. Вот пример: *фоторасщепление дейтрона*:



Фактически этот процесс дает хороший способ измерения массы нейтрона. Нужно только найти минимальную энергию, которую должны иметь γ-кванты в этом процессе, и скомбинировать ее с массами водорода и дейтерия, измеренными с помощью масс-спектрографов. Соотношение Эйнштейна применимо также к обратному



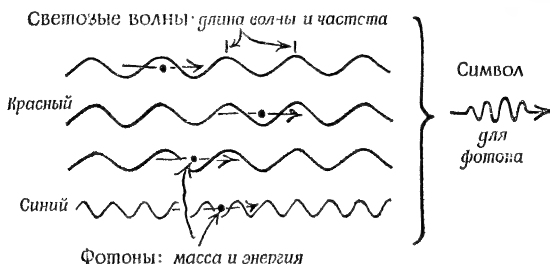
Фиг. 185. Фоторасщепление дейтрона.

Фотон γ-лучей с энергией 2,2 *Мэв* или больше может разорвать ядро тяжелого водорода на протон и нейтрон.

процессу: быстро движущиеся электроны могут, останавливаясь в мишени, создавать рентгеновские лучи. Чем выше напряжение на пушке, тем больше кинетическая энергия электронов и тем выше максимальная частота образующихся рентгеновских лучей. (Это дает полезное правило, поскольку частота определяет проникающую способность рентгеновского излучения.) Гораздо более медленные электроны могут иногда создавать кванты видимого света, замедляясь при столкновениях.

Фотоны

Таким образом, в начале этого века была принята квантовая теория с ее единственным правилом: энергия кванта $= h \cdot$ частота. Она успешно объяснила спектр излучения удельную теплоемкость, фотоэлектрический эффект, образование рентгеновских лучей. Планк показал, что при излучении атомов энергия упакована в кванты. Затем Эйнштейн продвинулся еще дальше, показав, что излучение само по себе должно быть упаковано в кванты. Это было в 1905 г.— в том самом году, когда он опубликовал также свою теорию броуновского движения и выдвинул специальную тео-



Фиг. 186. Природа света.

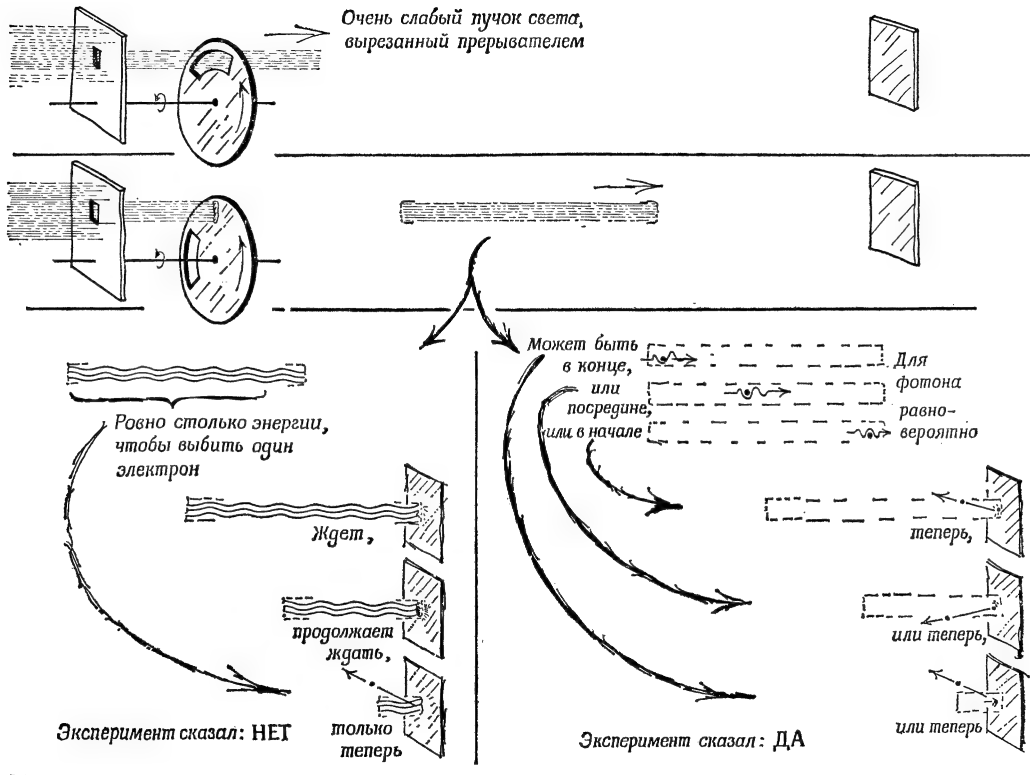
рию относительности! Таким образом, квантовая теория с помощью Эйнштейна превратилась из правила упаковки в стройное рассмотрение излучения как малых частиц. Чтобы подчеркнуть представление о частицах, всякий раз, когда имеют в виду корпускулярный аспект в поведении излучения, говорят о *фотонах* (по аналогии с *электронами*, *нуклонами* и т. п.). Все фотоны перемещаются (в вакууме или воздухе) со скоростью света c. Тогда, как следует из релятивистской формулы для массы, они должны иметь нулевую массу покоя. Это не вещество, поскольку их никогда нельзя найти покоящимися. При движении они имеют массу m, такую, что

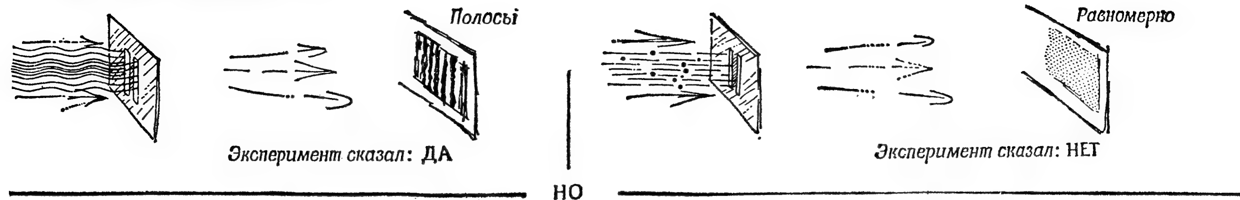
$$\text{энергия, } mc^2 = \text{энергия, } h\nu$$

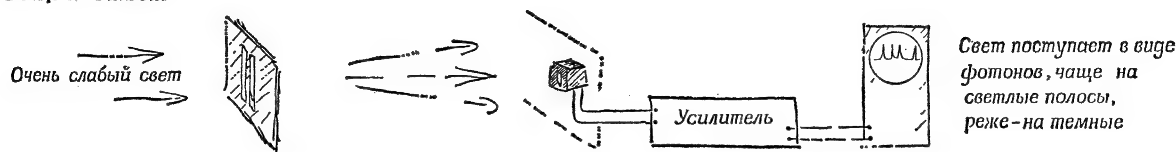
и

$$\text{импульс} = mc = \frac{\text{энергия}}{c} = \frac{h\nu}{c}.$$

Таким образом, мы представляем излучение как ведомый волнами, перемещающимися со скоростью света c, *поток фотонов*, каждый из которых переносит массу, импульс, энергию $h\nu$.


Проблема энергии
Очень слабый пучок света, вырезанный прерывателем
Может быть в конце, или посредине, или в начале
Для фотона равновероятно
Ровно столько энергии, чтобы выбить один электрон
Ждет,
продолжает ждать,
только теперь
теперь,
или теперь,
или теперь
Эксперимент сказал: НЕТ
Эксперимент сказал: ДА





Фиг. 187. Природа света.

В экспериментах проявляются две свойственные свету формы поведения, которые кажутся противоречивыми, но которые можно согласовать следующим путем. Пропускаем свет через «прерыватель» (отбирающий короткие сигналы света) и направляем его на поверхность металла, из которой свет может выбивать электроны. При этом используется настолько слабый пучок света, *что если свет представляет собой непрерывный поток волн*, то нам всегда придется ждать почти до конца такого сигнала, прежде чем наберется энергия волны, достаточная для вырывания одного электрона. Однако, *если свет представляет собой поток частиц*, мы ожидаем, что электроны будут испускаться на произвольных стадиях: иногда в конце сигнала, иногда в середине, а иногда при поступлении самого начала сигнала. Такой эксперимент был проделан. Каждый выбитый электрон ускорялся к мишени, где он выбивал большое число электронов в «фотоэлектронном умножителе», который действует как усилитель для одного выбитого электрона. Импульс заряда от этого усилителя наблюдался на осциллографе, развертка которого синхронизована с прерывателем. Оказывается, импульсы поступают произвольно во все моменты светового сигнала. Посмотрите об этой демонстрации замечательный кинофильм Джона Кинга «Фотоны», сделанный P.S. S. C. (В фильме, который вы увидите, этот вопрос иллюстрирован такой задачей: человек хочет получить литр молока из снабжающего его потока, который поступает через прерыватель. Имеются две формы снабжения: 1) сплошной поток по желобу, при котором человеку приходится ждать определенное время, пока наполнится его литровая бутыль; 2) конвейер, доставляющий ему литровые бутылки, наполненные молоком,— причем они беспорядочно расставлены вдоль конвейера.)

Теперь свет от одного источника будем пропускать через две щели и посмотрим, какая картина получится на удаленном экране. *Если свет представляет собой поток частиц*, то в том месте экрана, куда попадает свет от обоих источников, должно быть сплошное светлое пятно. *Если же свет — непрерывный поток* волн, то на экране должны быть интерференционные полосы. Фактически мы видим полосы — интерференционные полосы Юнга.

Но если наблюдать, как поступает энергия в интерференционные полосы, то можно обнаружить, что она поступает в частицах (квантах или фотонах). На светлые полосы поступает много фотонов, тогда как на темные — очень мало. Итак, мы можем сказать, что свет состоит из частиц, ведомых волнами при образовании интерференционной картины. (См. другой превосходный фильм P.S.S. C. «Интерференция фотонов», снятый Джоном Кингом.)

Столкновения фотонов с электронами. Комптон-эффект

Поскольку фотоны переносят импульс, они должны оказывать давление на поглощающую стенку, а на полностью отражающую стенку — удвоенное давление. Оказывается, это в самом деле так. Измерение очень малого давления пучка света было выполнено [1] и подтвердило выражение для импульса E/c. Если фотоны представляют собой компактные частицы, обладающие импульсами, то значения этих импульсов должны изменяться при столкновениях с другими частицами, такими, скажем, как электроны. Так и происходит. Фотоны рентгеновского излучения отклоняются при столкновении с электронами, слабо связанными в некоторых атомах, и уходят в новом направлении с меньшей энергией и, стало быть, большей длиной волны. Электроны же отскакивают с соответствующей частью первоначальной энергии фотона, и их короткие следы отдачи можно увидеть в камере Вильсона. Такой «эффект отдачи» открыл А. X. Комптон, и его измерения согласуются с предсказаниями для таких столкновений между «частицами». (Разумеется, для предсказаний нужно использовать релятивистскую механику, поскольку фотоны движутся со скоростью света.) Этот эффект дает одно из лучших доказательств того, что фотоны представляют собой частицы, которые подчиняются механическим законам сохранения и при столкновениях с частицами вещества могут передавать одновременно энергию и импульс.

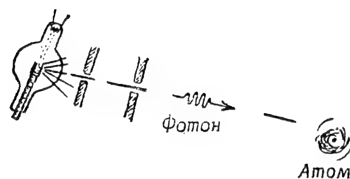
Атом «действия», *h*

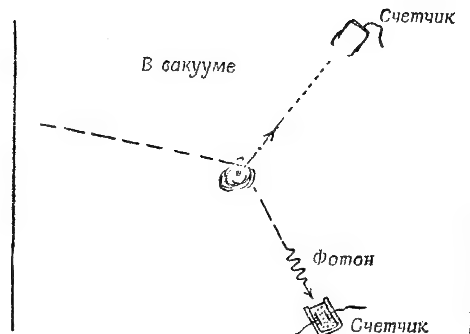
Постоянная Планка h — это универсальная «атомная» постоянная. Подобно скорости света, ее величина не изменяется при преобразованиях теории относительности — она одинакова для всех наблюдателей. Это не атом энергии. Это атом отношения энергия/частота или же произведения энергия·период, или же произведения энергия·время, которое называется «действием». Если вы подумаете, то сообразите, что в ньютоновской механике действие имеет вид произведения: сила·расстояние·время. Глядя на это выражение, можно предположить, что такая величина вполне может обладать полезными свойствами. Это в самом деле так. Законы Ньютона и многие другие законы физики можно переформулировать такими словами: «Снаряды, планеты, электроны, световые волны,— *все* физические объекты выбирают для своего

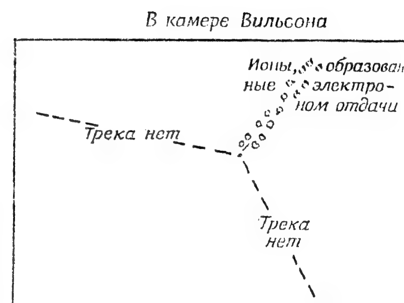
---

[1] Эти эксперименты были выполнены П. Н. Лебедевым в конце прошлого века.— *Прим. перев.*

Эффект Комптона







Фиг. 188. Эффект Комптона.

Фотон рентгеновского излучения, столкнувшись со слабо связанным атомным электроном, уходит с меньшей энергией (большей длиной волны); электрон испытывает отдачу.

движения такой путь, чтобы ДЕЙСТВИЕ было или минимально, или максимально, — говоря математическим языком, принимало экстремальное значение. Природа ведет себя так, как будто ей нежелательно, чтобы ДЕЙСТВИЕ оказалось чуть меньше или больше».

АТОМ БОРА — РЕЗЕРФОРДА, 1915—1925 гг.

Резерфордовская модель атома имела успех — она способствовала размышлениям и экспериментам,— но парадокс оставался. В атоме вокруг ядра существует поле, убывающее по закону обратных квадратов (что было доказано рассеянием альфа-частиц), а электроны остаются в этом поле далеко от ядра (это также было подтверждено рассеянием альфа-частиц, а позднее спектрами рентгеновских лучей). Поэтому: 1) электроны не могут покоиться в состоянии устойчивого равновесия (теорема Ирншоу). Атомы не разрушаются, излучая при этом электромагнитные волны; следовательно, 2) электроны не могут находиться в движении по эллиптическим кеплеровским орбитам. Утверждения 1) и 2) противоречат друг другу. Далее, *иногда* атомы излучают; они испускают свет. Световое излучение раскаленного газа расщепляется на очень резко определенные цвета, спектральные «линии» определенной длины волны и частоты колебаний. Частоты излучений возбужденных атомов весьма определенно сгруппированы в несколько серий, характерных для атомов каждого элемента. К 1905 г. были известны общие формулы для спектральных серий, а измеренные частоты некоторых серий расшифрованы с помощью простого закона, для которого теория не могла предложить удовлетворительного объяснения. По-видимому, этот простой закон каким-то образом учитывал квантовые ограничения, поскольку дело касалось фотонов. (Каждая спектральная линия представляет собой свет одного цвета, одной частоты, поэтому она должна представлять собой поток фотонов с одинаковой энергией.) Этот простой закон содержит постоянную, которая оказывается одинаковой для многих спектров. Если бы удалось получить эту универсальную константу спектров, комбинируя другие общие постоянные, такие, как заряд электрона e, скорость света c, постоянная Планка h и т. п. (и подбросив им на помощь числа типа π, 2 или $\sqrt{2}$), это было бы очень приятным открытием. А если бы при этом еще можно было привести ясные теоретические аргументы в пользу выбора именно такой комбинации, то это было бы великим открытием. В этом направлении было много попыток и заявлений об успехе — ученые от Пифагора до Кеплера и позже вплоть до нынешних дней искали

золотое правило, которое бы объединило вместе наиболее важные числа; результаты этих поисков простирались от бессмыслицы до знаменитых открытий. Бор не только нашел такую комбинацию для постоянной спектра, но и обосновал ее, что принесло ему прочную славу.

Атом Бора. Правила

В 1913 г. смелый и неизвестный молодой датский физик Нильс Бор предложил минимальные изменения классической физики, с помощью которых можно объяснить факты и, комбинируя которые, сделать замечательные предсказания. Обратившись к парадоксу со стабильностью атомов, которые должны были бы быстро коллапсировать [1], он предложил следующие новые правила:

ПЕРВОЕ ПРАВИЛО. Атомы построены в соответствии с моделью Резерфорда, но *электроны движутся по стабильным орбитам без излучения.* (Хотя этим заявлением противоречие было только подтверждено, но его ясное признание уже было большим утешением.)

ВТОРОЕ ПРАВИЛО. Разрешены только некоторые орбиты. Эти стабильные орбиты определяются по квантовым правилам следующим образом. У электрона, движущегося по стабильной орбите, ДЕЙСТВИЕ должно всегда быть равным h, или $2h$, или $3h$, ..., nh, ... [2]. Имеем

ДЕЙСТВИЕ = ЭНЕРГИЯ · ВРЕМЯ,
= [СИЛА · РАССТОЯНИЕ] · ВРЕМЯ,
= [СИЛА · ВРЕМЯ] · РАССТОЯНИЕ,
= ИМПУЛЬС · РАССТОЯНИЕ.

---

[1] Т. е. электроны должны были бы, теряя энергию, падать на ядра. *Прим. ред.*

[2] Этот выбор не представляется очевидным или однозначным. Как в свое время Кеплер, Бор искал *простое* правило, которое могло бы *описать факты*. Кеплер начал с круговых орбит, Бор — с классической физики.

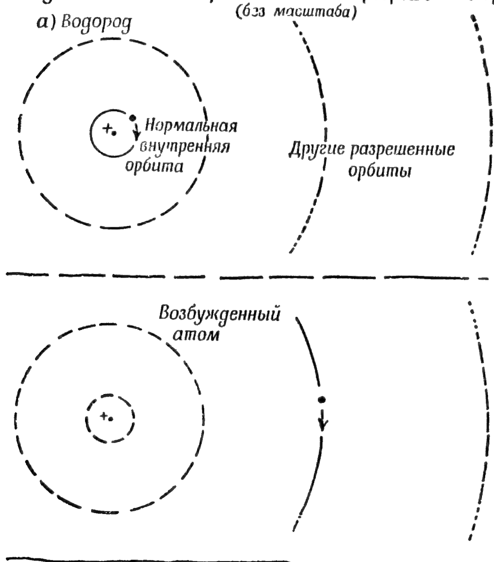
Для круговой орбиты, например, мы смело берем в качестве РАССТОЯНИЯ ДЛИНУ ОКРУЖНОСТИ и пробуем проверить правило:

$$\text{ИМПУЛЬС} \cdot (\text{ДЛИНА ОКРУЖНОСТИ}) = h,$$

$$\text{или } 2h, \text{ или } 3h, \ldots .$$

Вообще, $mv \cdot 2\pi R = nh$, где $n=1$ соответствует низшей разрешенной орбите, $n=2$ — следующей и т. д. *Квантовое число n должно быть целым числом.*

На модель атома в виде солнечной системы таким образом накладываются жесткие ограничения: разрешены лишь определенные орбиты, а именно только такие, на которых ДЕЙСТВИЕ равно nh, где n — целое число.

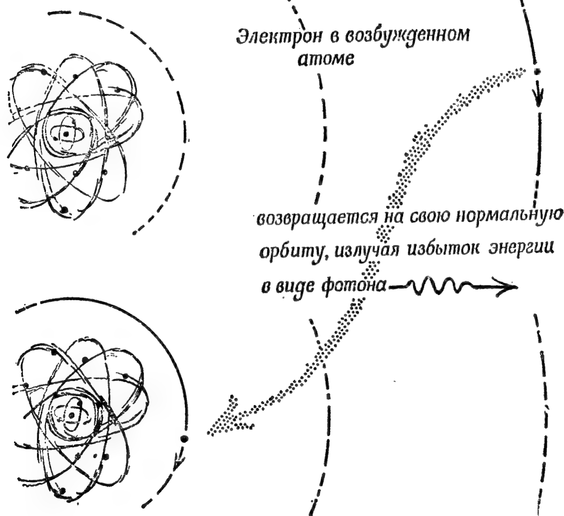


*Фиг. 189*а.

б) Другие атомы



в) Излучение



Фиг. 189б.

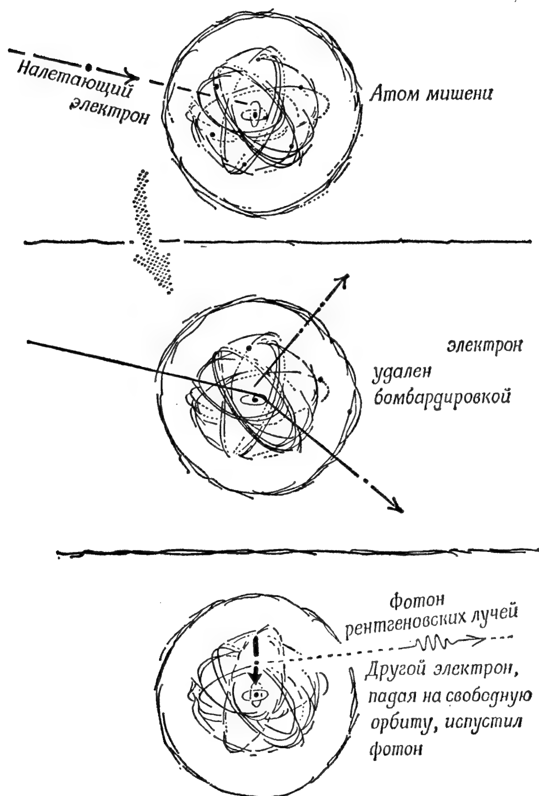
ТРЕТЬЕ ПРАВИЛО. Один из электронов атома можно переместить (например, при бомбардировке) на свободную внешнюю орбиту, так что получится «возбужденный» атом с большей энергией. Затем электрон может перескочить с внешней орбиты на свободную внутреннюю. *Когда это происходит, атом испускает избыток энергии в виде кванта света.*

$h \cdot$ ЧАСТОТА ИСПУЩЕННОГО СВЕТА =

= ИЗБЫТОК ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНА =

= ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОНА на «внешней» орбите —

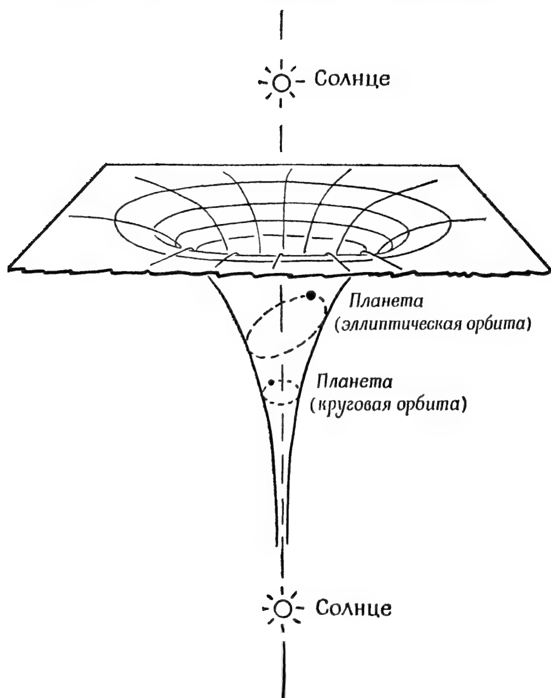
— ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОНА на «внутренней» орбите.



Фиг. 190.

Атом Бора. Плодотворная теория

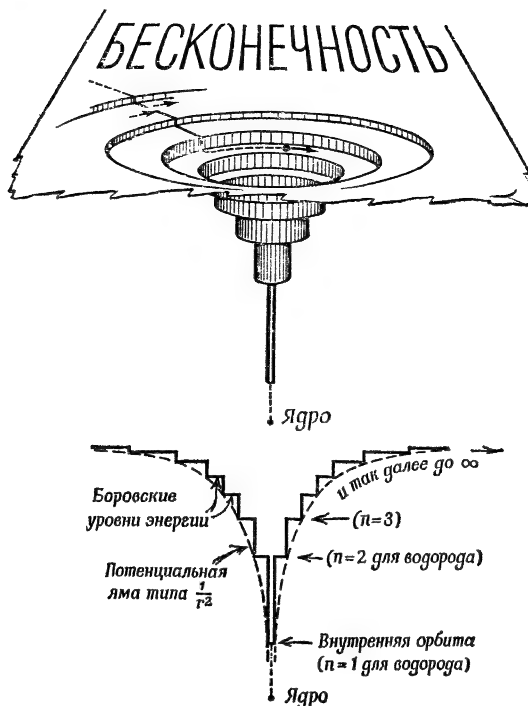
Бор сохранил резерфордовскую картину атома, в котором электроны мчатся по орбитам вокруг ядра, притягивающего их с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния. Поэтому «диаграмму холма» для их энергии (диаграмму потенциаль-



Фиг. 191. Энергетический холм (яма). Диаграмма для солнечной системы (из книги K. Mendelssohn, What is Atomic Energy, Sigma Books, Ltd.).

ной энергии) нужно было бы изображать по-прежнему. Как и в случае настоящей солнечной системы, эта диаграмма для сил *притяжения* изображает яму вместо холма. Но второе правило квантовых ограничений Бора как бы вырезает уступы вдоль стен ямы и ограничивает орбиты этими уступами. На фиг. 191 показан набросок «диаграммы холма» для Солнца, вокруг которого

по круговой орбите движется одна планета, а другая описывает эллипс. Этот «холм» был хорош для сил *притяжения* к Солнцу. Аналогичной была бы «диаграмма холма» для ядра и электронов в «атоме Резерфорда без квантовых ограничений». На фиг. 192 показана упрощенная «диаграмма холма» атома с набором «квантовых уступов» для круговых орбит. В схеме Бора были учтены также



Фиг. 192. Энергетический холм (яма). Диаграмма для модели атома Бора (из книги K. Mendelsshon, What is Atomic Energy, Sigma Books, Ltd.).

другие уступы (уровни энергии), отвечающие эллиптическим орбитам. Форма, размеры и другие характеристики каждой орбиты были определены несколькими квантовыми числами.

Низший уступ, определенный по квантовым правилам Бора значением $n=1$, дает наименьшую разрешенную орбиту. Здесь энергия электрона минимальна; эта орбита наиболее стабильна,

поэтому можно было бы ожидать, что электрон будет падать вниз до этого уровня, если только это возможно, и останется здесь. Действительно, следовало бы спросить: почему же не все электроны падают на этот нижний уступ, а все атомы не сжимаются до минимальных размеров? Мы знаем, что так не происходит, и это была одна из многих тайн, которые вскоре объяснились правилом, сформулированным В. Паули под названием *принципа исключения* [1]. Здесь принцип в сущности утверждает, что на уступе может находиться лишь один электрон, только один электрон с данным набором квантовых чисел. Никогда, ни в каком атоме несколько электронов не могут занимать совершенно одинаковые орбиты. Теперь, правда, мы удваиваем каждый выступ, чтобы поместить туда два электрона с противоположными спинами. С помощью современных знаний можно обосновать принцип Паули, однако долгое время он оставался произвольным, но очень полезным руководством для моделей атома.

В сущности Бор сказал: «Электроны не могут непрерывно излучать; атомы не подчиняются традиционным законам физики. Если вы примете мое смелое предположение, факты обретут больше смысла». А Паули добавил ограничительное правило: «Только один электрон на орбите». Эти правила выглядят как законодательство, основанное на декретах, но они успокаивают волнение, вызванное парадоксами атомной модели, обогащая знания. Они дали Бору возможность вычислить универсальную постоянную спектра, исходя из фундаментальных компонент e, h, c, e/m, и плодотворно объяснили все спектры, которые вскоре после объяснения перешли в разряд решенных проблем, и осветили другие нерешенные проблемы. Еще когда Бор продолжал развивать свои правила, Мозли использовал их в грубой теории спектров рентгеновских лучей, что позволило ему измерить атомные номера,— почти перед этим стал понятен смысл атомного номера с точки зрения строения атома, содержащего ядро.

Правила Бора, например, предсказывают диаметр обычного атома водорода, который уже был экспериментально известен из грубых измерений.

Размеры атома водорода

Общие размеры атома водорода определяются диаметром орбиты $2r$ единственного электрона, вращающегося вокруг ядра атома

[1] В русской литературе его чаще называют «принципом Паули».— *Прим. перев.*

(в модели Бора). Два атома, удаленные на расстояние больше $2r$, будут нейтральными друг для друга и не смогут взаимодействовать с большой силой. При расстоянии между атомами меньше $2r$ орбиты их электронов окажутся перекрывающимися, и здесь должны возникнуть нарушения, приводящие к притяжению, а при еще меньших расстояниях — к отталкиванию [1]. Таким образом, величина $2r$ должна определять «диаметр» атома при слабых столкновениях и, возможно, при образовании молекул. Экспериментальные оценки (грубые из длины молекулы масла и хорошие из данных о внутреннем трении в газообразном водороде) показывают, что «диаметр» атома водорода немного больше 1 Å (10^{-10} *м*). Ниже показано, как Бор вычислил величину $2r$ с помощью своих квантовых правил.

Квантовое правило Бора $mv \cdot 2\pi r = nh$ для электрона на самой низшей, наиболее стабильной орбите с $n=1$ даст $mv \cdot 2\pi r = h$, или $mv = h/2\pi r$. Электроны удерживаются на своих орбитах в атоме притяжением заряда ядра Ze, которое обратно пропорционально квадрату расстояния, так что

$$\frac{mv^2}{r} = \mathcal{B}\frac{(Ze)(e)}{r^2},$$

причем для водорода $Z=1$.

Используем алгебру, чтобы исключить отсюда орбитальную скорость электрона и найти радиус орбиты через h, $\mathcal{B}$ и т. п.:

$$\frac{mv^2}{r} = \mathcal{B}\frac{e^2}{r^2}; \quad mv^2 = \frac{\mathcal{B}e^2}{r};$$

$$mv = \frac{h}{2\pi r}; \qquad m^2v^2 = \frac{h^2}{4\pi^2 r^2}.$$

Разделив первое равенство на последнее, получим

$$\frac{mv^2}{m^2v^2} = \frac{1}{m} = \frac{\mathcal{B}e^2 \cdot 4\pi^2 r}{h^2},$$

т. е. радиус орбиты равен

$$r = \frac{h^2}{4\pi^2 \mathcal{B} e^2 m}.$$

[1] Это отталкивание — совсем не очевидное следствие. С точки зрения классической физики можно предполагать, что при этом легкие электроны сбиты с пути, а положительно заряженные ядра отталкиваются. Современный физик указал бы на принцип Паули: при столкновении электроны одного атома избегают контакта с электронами другого, предоставляя возможность ядрам отталкиваться. Как бы то ни было, при сближении атомов на достаточно малые расстояния они отталкиваются.

Используем экспериментальные значения:

h (по Планку или Милликену) — $6{,}62\cdot10^{-34}$ *дж·сек*;
$\mathcal{B}$ (из измерений силы, действующей на заряд в электрическом поле) — $9{,}00\cdot10^{9}$ *ньютон·м²/кулон²*;
e (Милликен) — $-1{,}60\cdot10^{-19}$ *кулон*;
m (из значения e по Милликену и e/m по отклонению заряда в полях) — $9{,}11\cdot10^{-31}$ *кг*.

Тогда

$$r=\frac{h^2}{4\pi^2\mathcal{B}e^2m}=\frac{(6{,}62\cdot10^{-34})^2}{4\ (3{,}14)^2\,(9{,}00\ 10^9)\,(1{,}60\ 10^{-19})^2\,(9{,}11\ 10^{-31})}=$$

$$=\frac{43{,}8\cdot10^{-68}}{4\cdot9{,}86\ 9{,}00\cdot10^9\cdot2{,}56\cdot10^{-38}\cdot9{,}11\cdot10^{-31}}=0{,}53\cdot10^{-10},$$

а в качестве размерности для r получается

$$\frac{(\text{дж}\cdot\text{сек})^2}{(\text{ньютон}\cdot\text{м}^2/\text{кулон}^2)\,(\text{кулон}^2)\,(\text{кг})},$$

что сводится к *метру*.

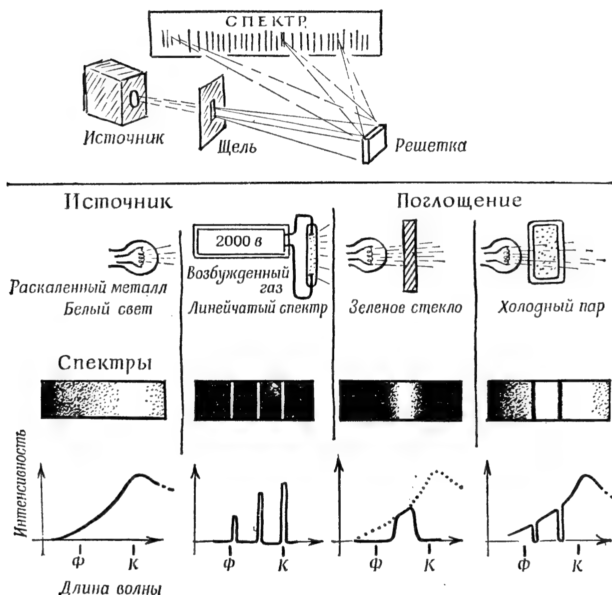
Здесь было приведено предсказание Бора для размеров атома водорода, полученное математически. Посмотрите на исходные величины:

h — постоянная Планка для квантов излучения; $\mathcal{B}$ — постоянная в законе Кулона; e и m — заряд и масса электрона. Вывод: *диаметр электронной орбиты* в невозбужденном атоме водорода $1{,}06\cdot10^{-10}$ *м*, или $\sim$1Å; «размер атома», в хорошем согласии с прямыми измерениями.

Бор и спектры — электронные гармоники?

Крупнейшим достижением теории Бора было предсказание ею спектра излучения раскаленного водорода. Этот линейчатый спектр был другим парадоксом, нуждавшимся в объяснении,— экспериментальные формулы требовали простой теории. Если раскаленные добела твердые вещества излучают сплошной спектр «черного тела», то пылающие газы (разогретые или возбужденные электрическим разрядом) дают совершенно иной спектр. Анализ их излучения показывает, что в спектре отсутствует свет большей части цветов, а имеются лишь очень узкие и очень яркие полоски определенных цветов, т. е. спектр состоит из ярких «линий», каждой из которых соответствует практически одна длина волны (см. гл. 10). У каждого газа есть свой характерный набор линий: красная линия (и

много других) у неона; желтая (и несколько ультрафиолетовых) у паров натрия (которые можно получить, поместив поваренную соль в пламя) и т. д. Длины волн ярких спектральных линий имеют вполне определенную величину для атомов каждого элемента. Они дают первоклассный способ анализа любых материалов — будь то образцы промышленных изделий или газы в далеких звездах. Линии каждого элемента группируются вдоль спектра в правильные серии с переменным шагом. С помощью выполненных

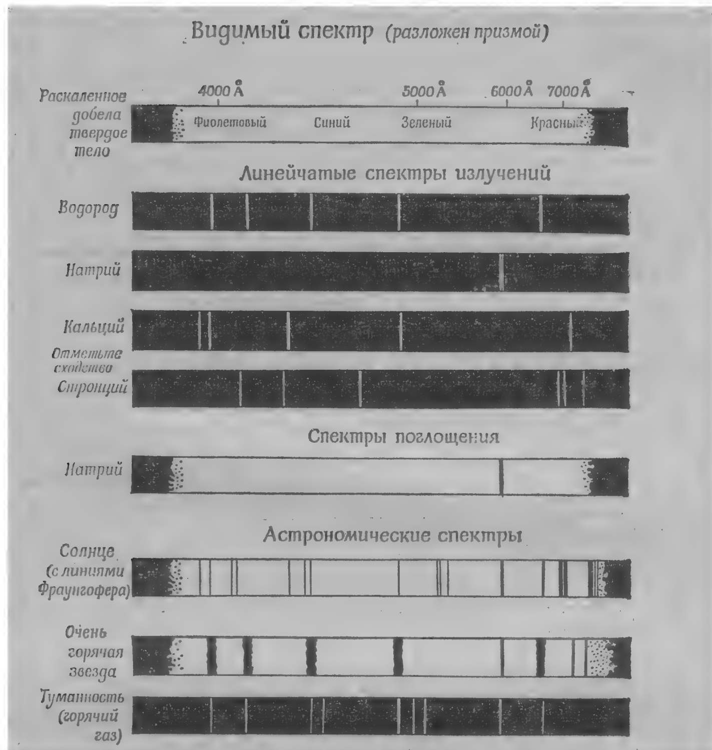


Фиг. 193. Получение и анализ спектров.

в прошлом веке тщательных измерений длин волн было рассортировано много таких серий. В расположении каждой серии явно наблюдается некоторая система. Для водорода и некоторых других газов из измерений было получено очень простое основное правило, отражающее такую систему.

Если белый свет из раскаленного твердого тела проходит через холодный газ, то мы можем наблюдать «спектр поглощения»: полный спектр белого света с черными линиями, в которых свет отсутствует, при длине волны, на которой газ излучал бы свет, если бы он был раскален. Эти линии поглощения можно использо-

вать для анализа атмосферы вокруг «твердых» звезд, в том числе и нашего Солнца, в спектре белого света у которых наблюдаются темные линии, характерные для водорода, паров натрия, кальция и т. д. Эти линии, очевидно, получаются из-за того, что атомы более холодного газа поглощают свет, который соответствует их «соб-



Фиг. 194. Эскизы спектров.

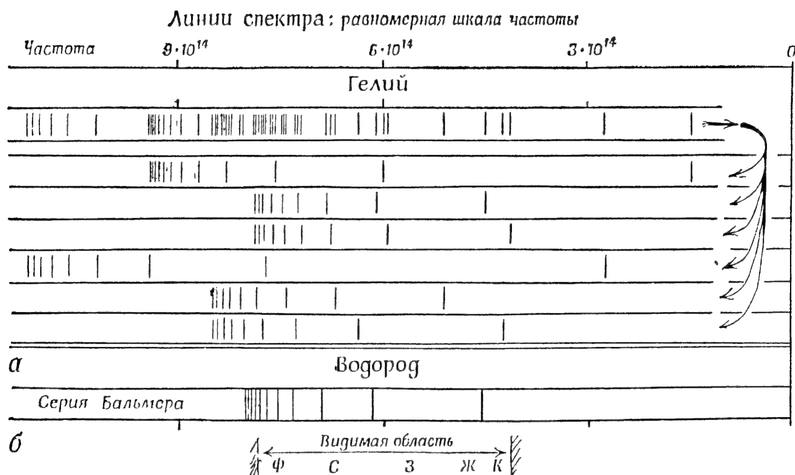
Эти черно-белые эскизы — только тусклая имитация. Взгляните на реальные вещи: посмотрите на неоновую вывеску через призму или дифракционную решетку; держите блестящую швейную иглу на солнце и рассматривайте ее через призму, которую следует держать близко к глазам, — вы увидите фраунгоферовские линии поглощения. (В реальных спектрах линий обычно гораздо больше, чем изображено здесь. Относительная яркость линий зависит от условий возбуждения атомов.)

ственным колебаниям»[1]. Они должны затем снова испускать точно такой же свет, но уже во всех направлениях, так что линия

[1] Здесь снова для одного и того же вида излучения хороший излучатель является хорошим поглотителем.

выглядит темной по сравнению с другими цветами, которые приходят непосредственно из более горячей «сердцевины» звезды. Эти факты снова наталкивают на мысль о некотором механизме колебаний, способном реагировать на волны определенной частоты.

Далее, было ясно, что атомы, возбужденные бомбардировкой или электрическим полем, могут колебаться и испускать волны света с различными частотами. Есть ли сходство между этими собственными «естественными частотами» атома и колеблющейся



Фиг. 195. Размещение линий спектров по шкале частот.

а — проанализированный по сериям спектр гелия, б — видимые серии атомарного водорода.

струной? Струна арфы или скрипки может колебаться с любой частотой из некоторой серии в соответствии с тем, что стоячая волна имеет одну пучность или 2, 3, 4, ... пучности. Тогда частоты находятся в той же самой пропорции, т. е. 1 : 2 : 3 : 4 : . . . , а издаваемые музыкальные ноты имеют соответствующие частоты. Для струны теория согласуется с экспериментом. Второй закон Ньютона предсказывает серию:

$$\text{частота} = (\text{постоянная } K)\cdot(n),$$

где $n=1, 2, 3, \ldots$ Частоты света разных цветов в спектре атома водорода образуют почти столь же простую серию, формула для

которой (из эксперимента) имеет такой вид:

$$\text{частота} = (\text{постоянная } K)\cdot\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right),$$

где $n=3, 4, 5, \ldots$ для последовательных линий серии. Точные измерения [1] с помощью высококачественной дифракционной решетки дали значение

$$K = 3\,290\,000\,000\,000\,000.$$

Бор *предсказал* эту формулу с постоянной K, равной

$$2\pi^2 m\mathcal{B}^2 e^2 (Ze)^2\cdot\frac{1}{h^3}$$

(см. следующий раздел). При использовании измеренных величин h, e, m и $Z=1$, $\mathcal{B}=9{,}00\cdot10^9$ эта формула дает

$$K = 3\,286\,000\,000\,000\,000.$$

В более полной форме предсказание Бора выглядело так:

$$\nu = K\left(\frac{1}{n_f^2}-\frac{1}{n_i^2}\right),$$

где n_f — «конечное» квантовое число для орбиты, на которую «падает» электрон, одинаковое для всех линий серии, а n_i означает «начальное» квантовое число другой орбиты, с которой «падает» электрон. Видимой серии для водорода соответствует $n_f=2$ и $n_i=3, 4, 5, \ldots$.

Задача 4

Две другие серии для водорода были уже известны, а еще две были открыты позднее там, где их предсказал Бор. Посмотрите на приведенную выше общую формулу и предскажите формулу для серии в ультрафиолетовой области с большими квантами и для серии вблизи инфракрасной области.

Другие элементы после возбуждения также дают линейчатые спектры, если они находятся в газообразном состоянии. При расшифровке большинства линейчатых спектров можно использовать почти ту же самую константу K, а остальная часть формулы имеет довольно похожую алгебраическую форму. Поэтому с точки зрения предположений Бора все линейчатые спектры приобретают

---

[1] Измерения спектроскопистов дали величину K/c (где c — скорость света) с относительной неопределенностью, меньшей 1/1 000 000. Вычисленная Бором величина согласуется с экспериментом в пределах 0,1%.

следующий смысл: каждая линия образуется в результате того, что электрон «перепрыгивает» с одной разрешенной орбиты (или «уровня») на другую, испуская разность энергий в виде кванта света этой спектральной линии. Сами по себе орбиты, определенные квантовыми правилами, стабильны: электрон может оставаться длительное время на одной из них, не излучая. В этом причина того, что (холодный) газ не светится до тех пор, пока его не облучат. Излучение испускается лишь при изменении орбит. Поэтому, чтобы электрон мог испускать свет, он должен сначала двигаться по внешней орбите, т. е. находиться на высоком энергетическом уровне и иметь возможность «упасть» на низший уровень. И в этом же причина того, что атомы газа испускают резкие спектральные линии, каждая из которых имеет определенную длину волны, поскольку получается при переходе между определенными орбитами. Таким образом, спектры создаются возбужденными атомами. Ион (атом, потерявший электрон), получая обратно потерянный электрон, может испускать одну или последовательно несколько линий, когда этот электрон «падает» с одного энергетического уровня на другой.

Сегодня понятие «стабильные орбиты» звучит слишком категорично, но мы будем использовать лишь их существенное свойство — определенность энергии на каждой из них — и поэтому будем говорить об «уровнях энергии».

Так Бор преобразовал спектроскопию, которая была эмпирической схемой исследования газов, в важное средство изучения атомной структуры.

Спектроскопическая постоянная по Бору. Примите на веру или вычислите сами

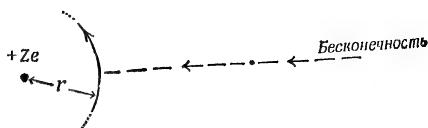
Предсказание постоянной K требует математических выкладок для вычисления энергии электрона в поле ядра. Примите на веру результаты таких выкладок, приведенные на математической схеме (фиг. 196), или проследите за приведенными ниже вычислениями.

Нам нужно знать энергию электрона для квантовых чисел $n=n_i$ и $n=n_f$. Тогда мы сможем предсказать частоту измеряемого фотона, поскольку

$$h\nu_{\text{излучения}} = \Delta E = E_i - E_f.$$

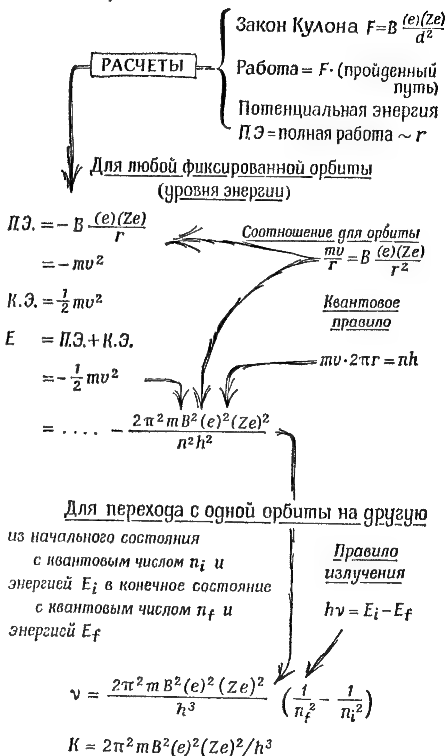
Электрон, движущийся по орбите, имеет энергию E, складывающуюся из кинетической энергии (К. Э.) и потенциальной энергии (П. Э.) (которая равна энергии, накопленной в электрическом поле системы электрон+ядро). Перенесем электрон из бесконечности

на расстояние r от ядра с зарядом Ze. Он притягивается ядром, поэтому при сближении электрона с ядром энергия переходит от электрического поля к электрону (в виде кинетической энергии). При изменении расстояния x между электроном и ядром на величину dx из электрической потенциальной энергии в кинетическую энергию передается величина



$$F \cdot dx \quad \text{или} \quad \mathcal{B}\frac{(-e)(Ze)}{x^2}\,dx.$$

Это *уменьшение* потенциальной энергии атома, т. е. энергия, реализованная из накопленного запаса. (Здесь эта величина положительна, поскольку как F, так и dx отрицательны: F — притяжение *внутрь*, а dx — смещение *внутрь*, уменьшение x.) Очевидно, наибольшую потенциальную энергию электрон имел на бесконечности, когда его отвели наиболее далеко от притягивающего ядерного заряда, и он по дороге туда накопил потенциальную энергию. Поэтому, если считать



Фиг. 196. Схема математических расчетов для атома Бора.

потенциальную энергию электрона на бесконечности равной нулю, то вблизи ядра она должна быть отрицательной.

Потенциальная энергия электрона, перенесенного из бесконечности на орбиту радиусом r, равна

$$0 - \int\limits_{x=\infty}^{x=r} \mathcal{B}\frac{(-e)(Ze)}{x^2}(dx),$$

что после интегрирования дает

$$0-\mathcal{B}\frac{(e)(Ze)}{r}.$$

Таким образом, потенциальная энергия электрона равна

$$\text{П. Э.}=-\mathcal{B}\frac{(e)(Ze)}{r}.$$

Поскольку при орбитальном движении

$-\frac{mv^2}{r}=\mathcal{B}\frac{(-e)(Ze)}{r^2}$ (знак минус показывает направление силы внутрь),

то

$$\text{П. Э.}=-\mathcal{B}\frac{(e)(Ze)}{r}=-mv^2=-(2\times\text{К. Э.}).$$

Полная энергия

$$E=\text{К. Э.}+\text{П. Э.}=$$
$$=\frac{1}{2}mv^2+(-mv^2)=-\frac{1}{2}mv^2.$$

Нам нужно знать выражение для энергии E (через квантовое число n и другие постоянные), не содержащее v или r. Воспользуемся соотношением для орбитального движения

$$-\frac{mv^2}{r}=\mathcal{B}\frac{(-e)(Ze)}{r^2}$$

и исключим r с помощью квантового правила $mv\cdot 2\pi r=nh$:

$$mv^2=\mathcal{B}\frac{(e)(Ze)}{r},$$

$$mv=\frac{nh}{2\pi r}.$$

Разделив первое равенство на второе, получим

$$v=\frac{\mathcal{B}(e)(Ze)(2\pi)}{nh}.$$

Тогда

$$E=-\frac{1}{2}mv^2=-\frac{1}{2}m\left[\frac{\mathcal{B}(e)(Ze)(2\pi)}{nh}\right]^2=$$
$$=-\frac{2\pi^2 m\mathcal{B}^2(e)^2(Ze)^2}{n^2h^2}.$$

Подставим $n=n_i$ для начального и $n=n_f$ для конечного уровней, между которыми переходит электрон, и получим

$$h\nu_{\text{излучения}}=E_i-E_f,$$

$$\nu_{\text{излучения}}=\frac{E_i-E_f}{h}=\frac{2\pi^2 m\mathcal{B}^2(e)^2(Ze)^2}{h^3}\left(\frac{1}{n_f^2}-\frac{1}{n_i^2}\right).$$

Откуда спектроскопическая постоянная

$$K=\frac{2\pi^2 m\mathcal{B}^2(e)^2(Ze)^2}{h^3}.$$

При подстановке измеренных значений e, e/m, h, $\mathcal{B}$ и для водорода $Z=1$ эта формула дает превосходное согласие с величиной K, полученной экспериментально из измерений спектров, а именно $3{,}286\cdot 10^{15}$ в сравнении с $3{,}290\cdot 10^{15}$.

Дальнейшие предсказания

Предсказания Бора можно продолжить. Предположим, атом гелия потерял один из двух своих электронов, а оставшийся электрон испускает свет при переходе между орбитами. Тогда ионизованный атом гелия с одним оставшимся электроном подобен атому водорода с двойным зарядом ядра $+2e$. Для $Z=2$ предсказываемые частоты излучения ровно в 4 раза больше частот излучения водорода (см. формулу Бора для K). Такие линии были уже открыты в спектре гелия при искровом разряде и ошибочно приписывались водороду в каком-то необычном состоянии. Бор не только указал, что они исходят от однократно ионизованного гелия, но, используя входящую в предсказание малую поправку на конечность массы ядра, оценил отношение массы электрона к массе протона и получил 1/1830.

Кроме того, формула Бора для водорода, примененная к переходам внутренних электронов в тяжелых атомах, предсказывает частоту рентгеновского излучения, которая много больше частоты видимого света, поскольку постоянная K содержит [1] множитель Z^2. Это позволило Мозли сравнить атомные номера (Z) различных элементов, находя квадратный корень из частоты рентгеновского

[1] Атомный номер вольфрама, который обычно используется в качестве мишени в рентгеновских трубках, равен 74; поэтому множитель Z^2 увеличивает частоту в 74^2, т. е. 5500 раз, и уменьшает в 5500 раз длину волны по сравнению с излучением водорода, у которого $Z=1$. В результате спектр линий сдвигается из видимой области (~5000 Å для зеленого света) в область проникающего рентгеновского излучения (~1 Å).

Неограниченная энергетическая полоса для свободных электронов, проходящих через атом; гиперболические орбиты; скорость > скорости вылета; полная энергия положительна и может принимать любую величину, неограниченную квантовым правилом

„∞"

Электрон на „бесконечности", полная энергия равна нулю

Квантовые числа

Нулевая энергия

A_3 B_2 C_1 A_2 B_1 A_1

$n+3$

$n+2$

$n+1$

n

C

B_1 B_2 B_3 Другие серии

A_1 A_2 A_3 A_4 и т. д.

Эти переходы образуют серию спектральных линий

Уровни энергии полная энергия электрона в стабильном состоянии с характерным квантовым числом

Схема орбит: низший уровень

По частоте и, следовательно, по энергии:

$B_1 = A_2 - A_1$

$B_2 = A_3 - A_1$

и т. д.

разность двух членов различных серий сама дает член одной из атомных серий. Это дает основания считать, что атом имеет различные уровни энергии, каждая разность которых дает спектральную линию

Разности A, B, и т. д. дают энергию фотона в спектральной линии

Картина орбит (не считается более правильной)

Уровни энергии (сохраняют свою полезность)

Фиг. 197. Уровни энергии в боровской модели атома (упрощенно).

излучения от соответствующей мишени. Это был первый простой способ измерения атомных номеров. Атомы любого элемента могут излучать несколько серий, причем формулы, связывающие частоты соответствующих линий из разных серий имеют вид арифметических разностей. Бор сразу объяснил эти соотношения, приписав все спектральные линии *переходам* с одних энергетических уровней на другие. Каждая серия относится к определенному *конечному* уровню энергии. Тогда вычитание частоты одной линии из другой дает разность между энергиями двух верхних уровней, и эту разность можно получить несколькими вычитаниями (фиг. 197). Бор смог также вычислить «энергию ионизации» атома водорода, т. е. энергию, необходимую для полного удаления электрона из атома. По его предсказаниям эта величина равна 13,54 *эв* [1]. Трудный эксперимент — бомбардировка атомарного водорода электронами — дал значение 13,6 *эв*.

Используя измеренные спектры частот рентгеновского излучения и видимого света, Бор изобразил энергетические уровни атомов всех элементов и построил схему строения атома, объясняющую периодическую систему химических элементов. В его схеме электроны вращаются по определенным окружностям (или эллипсам), образующим группы, или оболочки. Это была довольно удачная схема. Она «объяснила» общие химические свойства элементов и даже предсказала свойства одного неизвестного элемента и помогла его открыть (речь идет о гафнии).

Плодотворность теории подтвердила объявленные Бором правила; но они оставались произвольными правилами без обоснований.

Основа уверенности Бора. Принцип соответствия

Все же эти правила были не совсем произвольными, поскольку Бор прежде всего сохранил надежную связь с прежней теорией. Рассмотрим некоторый *предельный* случай, когда квантовые ограничения становятся несущественными. Здесь предсказания, которые делает новая теория, должны совпадать с предсказаниями старой, классической теории. В тех местах, где старый теоретичес-

---

[1] Подставьте в формулу для энергии E электрона на орбите с квантовым числом n значения $n=1$ и $n=\infty$. Чтобы найти энергию ионизации, найдите разность полученных величин. Проделайте это, используя измеренные значения e, e/m и т. д. и $Z=1$ для водорода. Если использовать единицы СИ, ответ получится в джоулях. Вспомните, что для перехода к электронвольтам нужно поделить результат на $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ *дж/эв*.

кий материал оказывается непригодным при объяснении фактов, его нужно вырезать; но новый материал, который используется для того, чтобы залатать брешь или расширить целое изделие, на краях должен вплетаться в старую ткань.

Принцип соответствия: в той области, где различия между предположениями старой и новой теории несущественны, обе теории должны перекрываться и находиться в согласии друг с другом. Такое утверждение кажется очевидным, но оно служит мощным направляющим правилом для новых предположений. Это общее правило подойдет для любой науки, для каждой хорошей теории. Примеры вы уже встречали:

> правила теории относительности сводятся к обычной геометрии и механике при малых скоростях (в предельном случае, когда множитель $\sqrt{1-v^2/c^2}\approx 1$).
>
> Формула Планка для излучения черного тела в длинноволновой области согласуется с классическими предсказаниями (в предельном случае, когда кванты малы и их много).
>
> Второй закон Ньютона $F=Ma$ сводится к первому закону Ньютона, если тело движется с постоянной скоростью (в предельном случае $a=0$).
>
> Законы Кеплера для эллиптических орбит согласуются с более простой теорией для круговых орбит (в этом предельном случае).

Думающий читатель сумеет распространить принцип соответствия дальше: на изобретение *или критику* новых теорий из области геометрии, развития популяций, промышленных циклов управления, этики. . .

Поэтому Бор постулировал, что квантовые правила для орбит должны накладывать все меньше ограничений при увеличении квантового числа. Для орбиты с n, равным, скажем, 1000, переход на соседнюю орбиту должен тогда сопровождаться лишь малым *процентным* изменением величины «действия» электрона (равному произведению импульс·длина окружности). Дискретность действия, требуемая квантовой теорией, должна быть несущественна. До перехода и после него электрон должен иметь почти одну и ту же частоту обращения, а частота, которую может иметь испущенный свет, совпадает с этой почти неизменной частотой обращения электрона — как этого и требует классическая теория. В этом предельном случае больших n правила Бора действительно приводят к согласию со старой теорией. Потребовав соответствия, Бор

смог найти нужное новое правило $mv \cdot 2\pi r = nh$; но хотя принцип соответствия помогает выбрать верное правило, однако не дает его обоснований. И все-таки Бор и другие ученые, выдвигая замечательные предположения новой теории, продолжали требовать такого «соответствия», или согласования в той области, где новая теория встречается со старой.

Трудности

Эта плодотворная теория испытывала трудности трех видов:

а) Она оказалась не в состоянии детально предсказать спектры других атомов (кроме водорода); она не могла объяснить химические силы и строение молекул.

б) В руках людей, рассуждающих менее осторожно, чем Бор, *модель* обрела черты *реальности*. Орбиты стали четко очерченными в пространстве — на обложках некоторых книг их так и продолжают изображать! Ученые забыли предостережение Эйнштейна: не украшать теорию деталями, которые нельзя проверить. Нам никогда не удается увидеть орбиты. Их можно сконструировать, только *предположив*, что применимы макроскопические (большего масштаба) правила планетарной солнечной системы. В действительности известно лишь то, что у атомов есть определенные уровни энергии и что при переходах между уровнями испускаются и поглощаются фотоны.

в) Более того, квантовое правило Бора для выбора орбит или уровней по-прежнему не имело правдоподобного объяснения, и не было никаких причин электронам оставаться на орбитах, не излучая.

Дальнейшее применение этой теории, как это случается со многими другими хорошими теориями, обнаружило ее слабость. Для спасения теории ее нужно было модифицировать, и вскоре это было сделано. Изменение теории было радикальным и началось с экстраординарного предположения, которое сделал французский физик Луи де-Бройль.

ЧАСТИЦЫ И ВОЛНЫ

Новая теория

«*Давайте будем рассматривать электроны подобно световым волнам*,— предложил де-Бройль.— *Хотя это частицы вроде снарядов, но они являются также и волнами*».

Свет имеет два типа свойств, которые кажутся прямо противоположными: волновые свойства и свойства снарядов (частиц). Разумеется, во многих отношениях оба типа свойств приводят к одинаковым результатам. Свет распространяется по прямой линии с определенной скоростью, он переносит энергию и импульс, оказывает давление на поверхность тел; его лучи отражаются и преломляются (искривляются) на границе различных материалов. Все это может происходить и с потоком снарядов, и с вереницей волн. Но имеется и существенная разница.

СНАРЯДЫ (частицы)	ВОЛНЫ
ПЕРЕНОСЯТ СВОЮ ЭНЕРГИЮ (КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ) И ИМПУЛЬС КОМПАКТНЫМ ПАКЕТОМ	ПЕРЕНОСЯТ СВОЮ ЭНЕРГИЮ, РАСПРЕДЕЛЕННУЮ ПО ВСЕМУ «ФРОНТУ ВОЛНЫ»
ПРИ НАЛОЖЕНИИ ДВУХ ПОТОКОВ ИХ ВКЛАДЫ ПРИБАВЛЯЮТСЯ ОДИН К ДРУГОМУ. СНАРЯДЫ + СНАРЯДЫ = БОЛЬШЕЕ ЧИСЛО СНАРЯДОВ	ПРИ НАЛОЖЕНИИ ДВУХ ПОТОКОВ (ИЗ ОДНОГО ИСТОЧНИКА) ИНТЕРФЕРИРУЮТ: ВОЛНЫ + ВОЛНЫ = БОЛЬШЕ ВОЛН В ОДНИХ МЕСТАХ, НО В ДРУГИХ МЕСТАХ ВОЛНЫ ОТСУТСТВУЮТ
ОТБРАСЫВАЮТ РЕЗКУЮ ТЕНЬ	ОГИБАЮТ ПРЕПЯТСТВИЯ
либо ПРОХОДЯТ через ДЫРКУ В СТЕНКЕ, либо НЕ ПРОХОДЯТ — СНАРЯД НЕ МОЖЕТ ПРОЙТИ ЧАСТИЧНО ЧЕРЕЗ ОДНУ, А ЧАСТИЧНО ЧЕРЕЗ ДРУГУЮ ДЫРКУ В ОДНОЙ И ТОЙ ЖЕ СТЕНКЕ	МОГУТ ПРОХОДИТЬ С ОДНОЙ СТОРОНЫ СТЕНКИ НА ДРУГУЮ ЧЕРЕЗ ЛЮБОЕ КОЛИЧЕСТВО ДЫРОК
	ПОПЕРЕЧНЫЕ ВОЛНЫ МОГУТ ОБЛАДАТЬ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Свет и любое другое электромагнитное излучение обладают свойствами, указанными в обоих колонках таблицы. Слабый свет звезд выбивает фотоэлектроны, отдавая всю свою энергию, куда бы он ни попал. Но, собирая тот же самый свет линзами огромного телескопа, можно получить интерференционную картину, в которой виден весь широкий фронт волны.

Рентгеновские лучи также выбивают фотоэлектроны, полностью передавая им свою энергию, а когда они рассеиваются на атомах, каждый квант отскакивает от некоторого электрона и точно так же, как это сделал бы снаряд, передает ему малый импульс отдачи (эффект Комптона, фиг. 188). Но при рассеянии рентгеновских лучей на кристаллической решетке, образованной слоями атомов, получается гладкая, коллективная картина интерференции; по-

добно световым волнам, у них также проявляется поляризация. Так что теперь мы описываем свет, рентгеновские лучи и т. п. как фотоны, *снаряды энергии* и *импульса*, ведомые вдоль своих траекторий волной; отчасти это соответствует давнишнему предположению Ньютона.

Де-Бройль сделал свое «возмутительное» предположение: *припишем реальным снарядам* (частицам) *такие же волновые свойства*. Если наделить каждую частицу вещества сопровождающей ее волной с неизвестной фазой, некоторой длиной волны и скоростью перемещения, то это позволит электрону, атому, *любому* движущемуся объекту образовывать интерференционную картину! Тогда мы должны сказать, что в некоторых отношениях *электрон ведет себя как волна* (является *волной*). В других случаях *он* ведет себя как частица (является *частицей*). Когда де-Бройль написал свое предположение в виде короткого поразительного письма в общедоступный научный журнал, многим казалось, что он почти сумасшедший. Со временем это принесло ему Нобелевскую премию. Ниже приведен его рецепт рассмотрения, основанный на том, что для света уже приняты и корпускулярное, и волновое представления. Воспользуемся связывающим их квантовым правилом, чтобы выразить длину волны через характеристики частиц:

СВЯЗЬ ДВУХ ТОЧЕК ЗРЕНИЯ НА СВЕТ:

Корпускулярная точка зрения	Квантовое правило	Волновая точка зрения
ЭНЕРГИЯ $= mc^2$ ИМПУЛЬС $= mc$	ЭНЕРГИЯ $= h\nu$	ДЛИНА ВОЛНЫ $= c/\nu$

$$mc^2 = h\nu$$

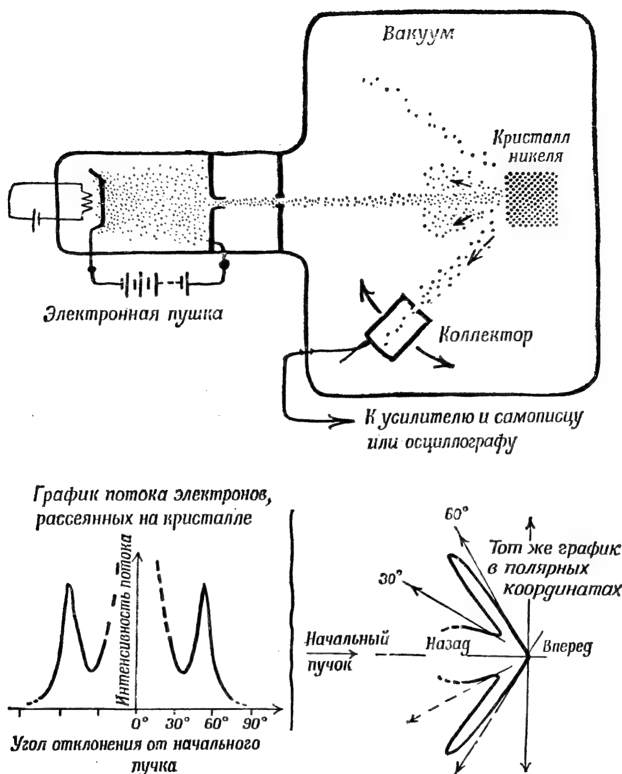
$$\text{ИМПУЛЬС} = mc = \frac{mc^2}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

$$\text{ДЛИНА ВОЛНЫ } \lambda = \frac{h}{\text{ИМПУЛЬС}}$$

Определим теперь длину волны λ *частицы вещества* точно так же:

$$\text{ДЛИНА ВОЛНЫ} = \frac{h}{\text{ИМПУЛЬС}} = \frac{h}{mv}\,.$$

Тогда частица, обладающая большой массой и обычной скоростью, будет иметь настолько малую длину волны λ, что эффектами интерференции и дифракции можно пренебречь,— винтовочная пуля должна лететь по прямой, а не осыпать мишень со всех сторон



Фиг. 198. Электроны как волны: опыт Дэвиссона и Джермера.

частями интерференционно-дифракционной картины. Но у малых частиц, таких, как электрон, должны проявляться волновые эффекты. Подобно рентгеновским лучам, электроны из трубки с разностью потенциалов 50—100 *в* должны иметь длину волны, сравнимую с расстоянием между атомными плоскостями в кристаллах. Дэвиссон и Джермер из лаборатории, принадлежащей компании «Белл телефон», наблюдали «волны электронов», облу-

чая маленький кристалл никеля потоком электронов [1]. К тому времени, когда де-Бройль высказал свое предположение, они уже обнаружили, что электроны, вместо того чтобы рассеиваться в широком интервале направлений, отдают предпочтение некоторым из них, что весьма загадочно для поведения частиц. Затем, приняв предположение о волнах, они проделали тщательные измерения: электроны из пушки с напряжением 54 *в*, которыми облучали кристалл никеля, интенсивно рассеиваются на угол 50° по отношению к отраженному назад пучку, а на все другие углы, кроме угла рассеяния назад,— очень слабо.

Задача 5. Волны электронов?

а) Рассчитайте длину волны де-Бройля для «54-вольтовых» электронов по следующей схеме: кинетическая энергия электрона равна энергии, полученной его зарядом при прохождении разности потенциалов 54 в.
Вычислите:

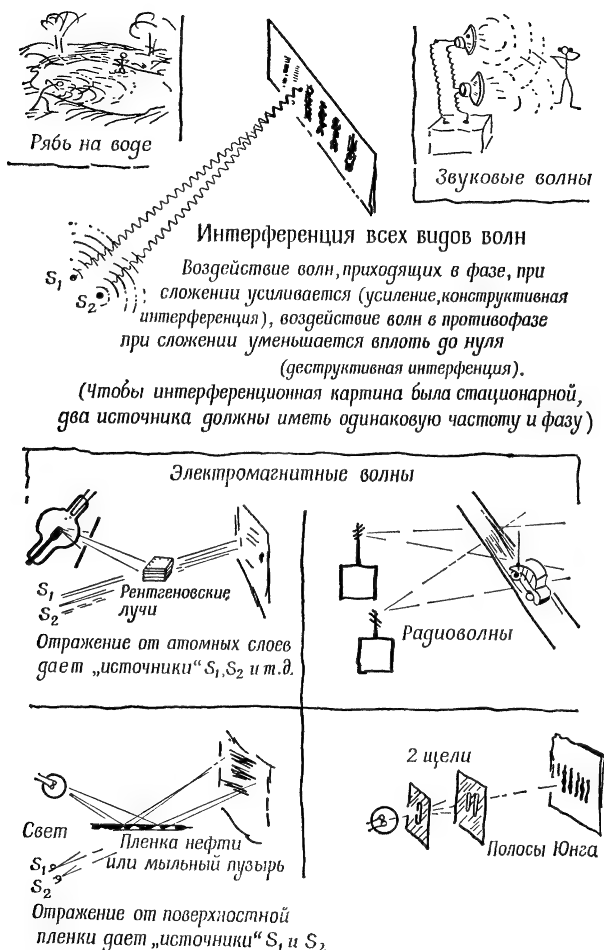
1) *скорость электрона v (пользуйтесь обычной механикой, поскольку он движется медленно по сравнению со светом. Возьмите $e/m=1{,}8\cdot 10^{11}$ кулон/кг);*
2) *его массу m. (Используйте значения e/m и e. Возьмите $e=1{,}6\cdot 10^{-19}$ кулон);*
3) *его импульс mv;*
4) *его длину волны λ. (Возьмите $h=6{,}6\cdot 10^{-34}$ дж·сек, или (м)·(кг м/сек).)*
Ответ к вопросу 4 получится в метрах. Выразите его также в ангстремах (10^{-10} м).

б) Повторите контрольные расчеты Дэвиссона и Джермера. По измерениям с рентгеновскими лучами им было известно, что расстояние между слоями атомов в их кристалле никеля составляет 2,15 Å. Волновая теория предсказывает, что для волн с длиной волны λ, падающих на дифракционную решетку с постоянной d, дифракционный максимум приходится на угол A, который определяется из соотношения $d\sin A=\lambda$. (Как в случае рентгеновских лучей, в случае электронов сильный дифракционный максимум создают несколько слоев *атомов, отражающих волны совместно в одной и той же фазе. Тем не менее можно все же использовать приведенную выше формулу для плоской решетки, выведенную в гл. 10. Но там d означало расстояние между штрихами решетки, здесь — расстояние между рядами атомов кристалла. При таком расчете для получения максимума дифракционного пучка требуется точно такая же длина волны, как и при полном трехмерном рассмотрении.)*
1) *Вычислите λ для волн, которые дают дифракционный максимум под углом 50° при рассеянии на кристалле с межатомным расстоянием $2{,}15\cdot 10^{-10}$ м ($\sin 50°=0{,}766$).*
2) *Сравните полученный результат с предсказанной вами в пункте а) «длиной волны» использованных электронов.*

---

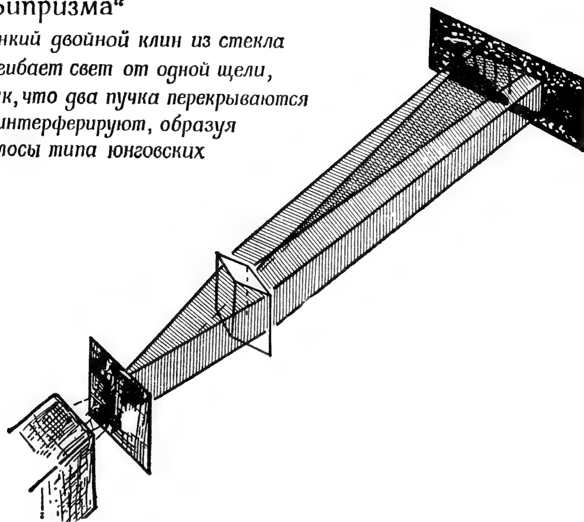
[1] Об их работе см. превосходный популярный рассказ Карла К. Дарроу в журнале «Scientific American», май 1948 г., том 178, № 5.

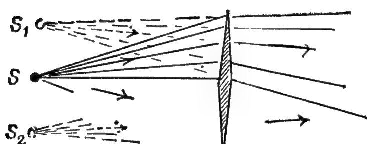
Измерения показали, что интерференционная картина соответствует длине волны $\lambda = h/mv$. Одновременно аналогичная проверка была проведена в Англии Г. Томсоном. С тех пор проводилось



Фиг. 199. Волны из двух когерентных источников образуют интерференционные полосы.

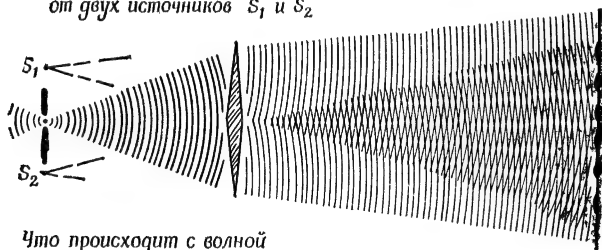
много измерений аналогичных дифракционных картин для потоков электронов, протонов, атомов и даже нейтронов. Эти картины по-





Что происходит с лучами: призма изгибает лучи от источника S, так что кажется, как будто свет идет от двух источников S_1 и S_2





Фиг. 200. «Бипризма» из стекла преобразует источник света в два источника, так что создаются световые интерференционные полосы.

казывают, что частицы движутся в направлении распространения волн. Волны сообщают нам, где мы сможем обнаружить частицы. [Никаких исключений в этом отношении мы не ожидаем. Убедившись в волновом поведении атомов, мы считаем, что оно свойственно также бейсбольным мячам и винтовочным пулям, но грубые оценки их длин волн даже при медленном движении показывают, что они (длины волн) слишком малы, чтобы их можно было измерить или как-либо заметить любые волновые эффекты.]

Наиболее яркую демонстрацию волновых эффектов придумал Г. Мёлленштедт. Он натянул чрезвычайно тонкую проволоку поперек пучка электронов, вылетающих из пушки. На удаленной фотопленке, регистрирующей поток, образуется тень проволоки. Затем проволоке сообщается малый положительный заряд. Электрическое поле этого заряда отклоняет поток электронов, проходящих по обе стороны от проволоки, поэтому тень исчезает, а вместо нее появляется «яркое» пятно в том месте, где перекрываются два потока, проходящих с двух сторон проволоки. В этом пятне видны полосы Юнга — места, где

«электроны + электроны = больше электронов»,

и другие места, где

«электроны + электроны = нет электронов».

В темных полосах отнюдь не происходит взаимного уничтожения электронов — просто они не могут туда попасть, поскольку волновая природа уводит их куда-нибудь в другое место.

Эта техника весьма трудна — картину нужно увеличить линзами электронного микроскопа,— но результаты великолепны. Посмотрите на фиг. 199—202 и сравните картину, образованную электронами, и аналогичную картину для световых волн.

Фиг. 201. Эксперимент Мёлленштедта.

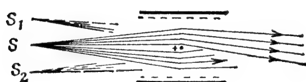
Для электронов электрическое поле возле положительно заряженной проволоки действует как «бипризма». Как и для фотонов, имеются «яркие» полосы в тех местах экрана, куда попадает много электронов, и «темные» полосы, куда попадает мало электронов,— направляющие «волны материи» создают интерференционную картину. Картина настолько мала, что ее приходится увеличивать линзами электронного микроскопа, а затем еще увеличивать с помощью оптики.

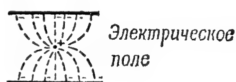
Интерференция волн вещества

Электроны образуют интерференционную картину, когда их пути искривляются электростатической бипризмой

Положительно заряженная проволока натянута между вертикальными пластинами, заряженными отрицательно.

Реальный проводник—не столбик, а очень тонкий проводящий волосок

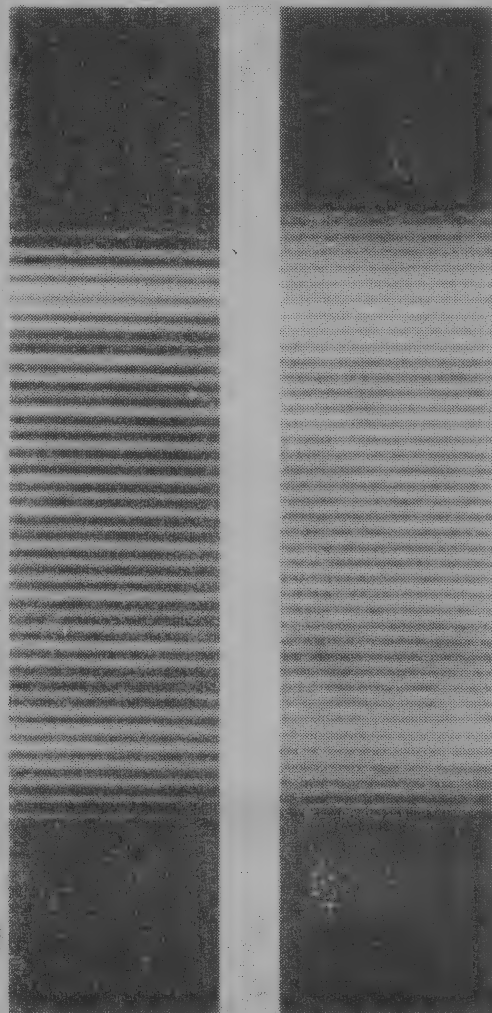






На электронный микроскоп для увеличения картины в 200 раз

Траектории электронов искривляются полем, так что кажется, будто они приходят из S_1, S_2



Фиг. 202. а — интерференционная картина, образованная видимым светом (увеличено в 30 раз).

Фотографию сделал Генри А. Хилл из Принстонского университета.

б — интерференционная картина, образованная электронами (увеличено в 5000 раз).

Фотография Г. Мёлленштедта и X. Дюкера из Тюбингенского университета. Эксперимент опубликован в журнале «Zeitschrift für Phisik», том 145, 1956.

Сложный конфликт

Идею дуализма «волна — частица» трудно воспринять для света, но еще труднее — для атомов, электронов и всех кусочков вещества. Свет, проходящий через пару щелей в стенке, образует на удаленном экране интерференционные полосы Юнга. Но его энергия, очевидно, переносится пулеподобными квантами, большая часть которых попадает на яркие и лишь малое число квантов — на темные полосы. Если через две щели проходит поток электронов [1], снова получается интерференционная картина, так что каждый индивидуальный электрон должен каким-то образом пройти через *обе* щели [2]. Его волна должна проходить через обе щели, иначе как же получится интерференционная картина? Но как это может сделать пуля?

Волновые пакеты

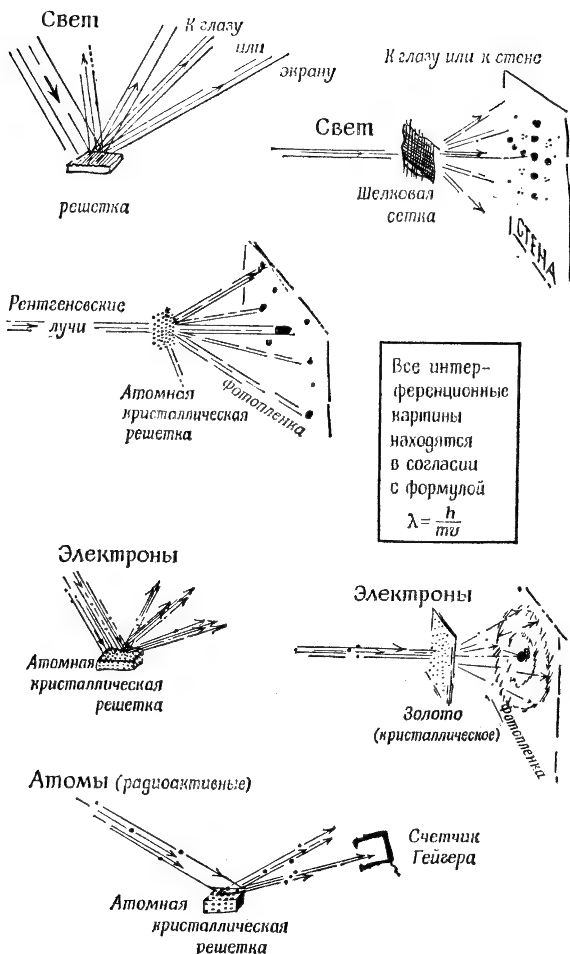
По отношению к этому парадоксу де-Бройль выдвинул некоторые утешительные соображения — но его аргументы сложны и требуют математики в большей мере, чем мы здесь дадим. Его идея состояла в следующем: представлять волны, соответствующие фотонам или частицам вещества, как компактную группу мелких волн, подобную всплеску на воде, который можно создать одиночным шлепком по поверхности воды в ванне или бассейне. Проследите, как такая группа волн распространяется по воде; вы увидите, что она с определенной скоростью v расплывается как кольцо возмущения. Теперь понаблюдайте за деталями такой группы при ее распространении. Она содержит маленькие волны, перемещающиеся *медленнее*, чем вся группа в целом. Маленькие волны позади передовой группы непрерывно погибают, тогда как на фронте группы рождаются новые волны. Эта идея группы волн, обладающих различными скоростями, составляет суть схемы де-Бройля. Электроны и световые кванты (фотоны) представляют собой группы волн, компактно переносящие энергию и импульс. То, что мы обычно наблюдаем как «частицу» (электрон, протон, фотон...),— это «волновой пакет» (см. фиг. 272 ч. I). Однако «всплески» внутри него образованы многими близкими длинами

---

[1] Фактически для электронов мы не можем сделать пару щелей, но для той же цели могут служить два слоя атомов в кристалле; можно также воспользоваться описанной выше схемой с заряженной проволокой.

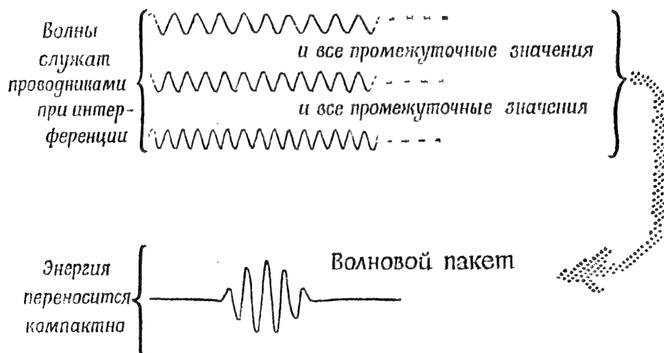
[2] Как на юмористической картинке, изображающей лыжню на горном склоне, две линии которой разделяются и проходят с двух сторон сосны, а затем соединяются снова.

волн, которые собираются вместе, создавая результирующую картину. Эти наборы волн находятся в фазе вблизи центра группы, а переходя в другие места, они взаимно погашаются. Но каждую индивидуальную волну-составляющую можно рассматривать как простирающийся далеко вперед и назад «путепровод». Это волна, которая приводит частицу-пакет к светлой полоске в интерферен-



Фиг. 203.

ционной картине. Волны, ведущие частицу, *перемещаются* быстрее, чем вся группа в целом, в противоположность волнам на воде. Импульс частицы с массой m и скоростью v равен mv; ее *волновой пакет* перемещается с *групповой скоростью* v, волнам пакета соответствует длина волны h/mv. А сами волны перемещаются со скоростью V, большей v. В действительности $Vv=c^2$, так что V даже больше c. Это не противоречит теории относительности, поскольку V — только скорость перемещения фазы волны, а не скорость распространения энергии. Вы можете представить себе волны, которые бегут впереди частицы, чтобы разметить интерференционную картину и сообщить частице, куда ей следует идти. Загадка дуализма «волна — частица» при этом сохраняется, но все же легче совместить идею волны с частицей, если говорить, что «то, что вы обычно наблюдаете как частицу, представляет собой компактный пакет волн (волновой пакет)» (взгляните снова на фиг. 272 ч. I).



Фиг. 204.

Идея де-Бройля не только объяснила эксперименты, в которых у электронов и других частиц обнаруживается волновое поведение, но и с совершенно неожиданной стороны осветила модель Бора. А затем привела к великому развитию современной атомной теории.

Волны и атом Бора

Де-Бройль прояснил причину загадочного правила $mv \cdot 2\pi r = nh$, установленного Бором для разрешенных орбит. Описывающий такую орбиту электрон имеет длину волны $\lambda = h/mv$, так что

$mv = h/\lambda$. Тогда правило Бора приводит к соотношению $(h/\lambda) \cdot 2\pi r = nh$, или $2\pi r = n\lambda$. С этой точки зрения стабильными являются только такие орбиты, на которых длина волны электрона укладывается целое число раз (n): $2\pi r_1 = \lambda_1$, $2\pi r_2 = 2\lambda_2$, $2\pi r_3 = 3\lambda_3$ и т. д. Электрон должен, так сказать, вплетать свою волну туда, где она уже есть (подобно змее, глотающей свой собственный хвост), и образовывать *стоячую волну* (см. гл. 10) с целым числом длин волн на окружности [1] (фиг. 206). Тогда мы уже видим не твердую частицу с центростремительным ускорением v^2/r, которая должна была бы излучать, а волновую картину, заполняющую орбиту. Для многих физиков такая картина давала по крайней мере удобное объяснение произвольного правила Бора: «разрешенные орбиты» соответствуют допустимым стоячим волнам.

Теперь мы рассматриваем эти волны де-Бройля как схему, которая сообщает нам о возможном местонахождении электрона: чем сильнее [2] волна в какой-либо области, тем вероятнее, что мы обнаружим там электрон. Эти волны — бегущие волны для движущихся свободных электронов или стоячие волны для электронов, связанных в атоме,— не есть волны движущегося вещества или переменного поля — это «волны вероятности». Кольцевые волны, предложенные впервые для объяснения боровских орбит, могут определять вероятность местонахождения электрона в некоторой области возле окружности. Либо они могут быть эквивалентны волнам, бегущим навстречу друг другу по кольцу. Тогда уже бесполезно спрашивать, в какой точке окружности расположен электрон. В настоящее время для указания вероятности местонахождения электрона мы имеем другие волновые картины для

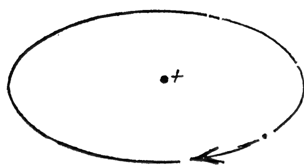
---

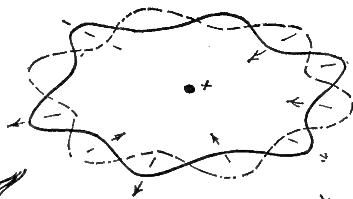
[1] Чтобы увидеть кольцевую стоячую волну, налейте до половины воду в круглую стеклянную бутылку. Резко сообщите бутылке небольшое вращательное движение и найдите частоту, при которой у стенок бутылки на поверхности воды образуется стоячая волна. Более детальную иллюстрацию стоячих волн см. в гл. 10.

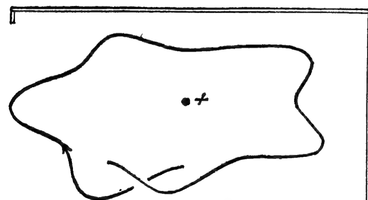


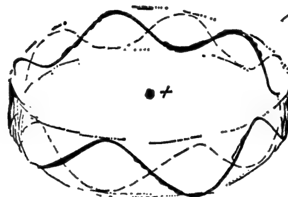
Фиг. 205.

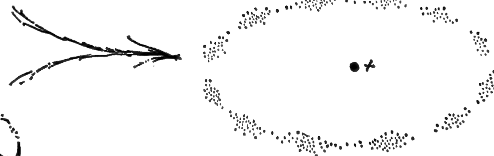
[2] Здесь «сила» измеряется КВАДРАТОМ (модуля) АМПЛИТУДЫ этой волны. (По существу, речь идет об интенсивности волны.— *Прим. ред.*)











Фиг. 206. Модель атома Бора, в которой электроны заменены волнами де-Бройля.

разных состояний: *радиальные* и *круговые* стоячие волны. Первая боровская орбита атома водорода заменена радиальной кривой, показывающей интенсивность волны и доходящей до самого ядра. Хотя большую часть времени электрон проводит на разных расстояниях от ядра, среднее расстояние совпадает с предсказанным ранее Бором. А если эту кривую симметрично покрутить по всем направлениям, она изобразит для электрона облако вероятности, рассеянное вокруг ядра. Волновые картины для более сложных атомов и для более высоких энергетических состояний показывают более сложную форму облака. Каждая картина изображает только облако вероятности *местонахождения* электрона, но частота волнового движения для данной картины является определенной, а это означает определенность уровня энергии электрона.

Такая точка зрения объясняет, в частности, почему атом не может сжиматься так, чтобы электроны двигались по все меньшим и меньшим орбитам. Если положение каждого электрона действительно описывается стоячей волной, то на длине окружности наименьшей орбиты должна укладываться ровно одна длина волны — немыслимо, чтобы в кольцевой стоячей волне содержалась только часть длины волны,— которая должна определить минимальный размер, до которого можно сжать атом. (Соответствующее ограничение для простейшей стоячей волны остается справедливым и при замене циркулярных «орбит» более общими картинами.)

Некоторый смысл приобретает и принцип Паули: посадите несколько тождественных электронов на одну и ту же «орбиту» — картины их стоячих волн сложатся в одну-единственную картину, и тогда мы можем ожидать, что обнаружим один электрон вместо нескольких [1].

Новая атомная теория

Мощный аппарат был развит Шредингером. Исходя из дебройлевского квантово-волнового постулата, он составил общее волновое уравнение (см. т. 2, стр. 588) для электронов. Затем он посмотрел, какие решения в форме стоячих волн должны соответствовать полю кулоновских сил, меняющихся по закону обратных квадратов

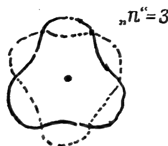
[1] Вряд ли можно признать убедительным или хотя бы правильным такое объяснение принципа Паули. Дело обстоит гораздо сложнее (например, фотоны и π-мезоны хотя и обладают волновыми свойствами, но не подчиняются принципу Паули), поэтому на первом этапе принцип Паули удобнее рассматривать как исходный закон, не требующий теоретических обоснований.— *Прим. перев.*

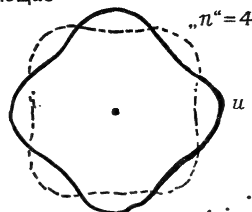
внутри атома. Это аналогично следующему: определить скорость волны вдоль натянутой струны (см. гл. 10: скорость^2=натяжение/масса на единицу длины); подставить ее в общее волновое уравнение ($\nabla^2 V=(1/c^2)(d^2V/dt^2)$); наложить «граничные условия», как, например, для жестко закрепленной струны длиной L (закреплены концы, что предотвращает движение в точках $x=0$ и $x=L$); затем найти частоты возможных стоячих волн (как в гл. 10, где вычислены частоты для 1 пучности, 2 пучностей и т. д.). В случае, который рассматривал Шредингер, частоты по квантовому правилу дают энергии. Волновые уравнения и граничные условия здесь более сложны, чем для струны, но они приводят к ценным результатам.

Эта новая интерпретация вскоре была математически применена к волновому рассмотрению электронов в атомах, которое далеко превосходит в успешных предсказаниях теорию Бора. Как и рассмотрение Бора, оно оказалось успешным в применении к атому водорода, даже с более тонкими деталями, и, сверх того, в применении к сложным атомам. Рассмотрение перераспределения электронов при химических превращениях в волновом описании также дало правильные предсказания. Волновое описание было успешно распространено на ядерную физику и интерпретировало радиоактивность в терминах волн-частиц, которые просачиваются через потенциальный барьер ядра. Все это — ценой отказа от какой-либо наглядно определенной модели или картины. Картина атома Бора содержала необязательные конкретные детали — недоказуемые экспериментально и, следовательно, недопустимые для любой долговременной научной теории. Теперь четкие орбиты исчезают и заменяются математическими формулировками волновой модели, которые дают определенные уровни энергии, в точности соответствующие энергиям электронов на старых боровских орбитах. Но у нас нет картины соответствующих волн. Кроме математической формулировки, у них нет ничего общего с волнами на воде или с волнами света. В нашем новом рассмотрении используются такие волны, интенсивность которых показывает, где с наибольшей вероятностью должен быть электрон. Интенсивность волны в выбранной области показывает, сколько шансов за то, что здесь находится электрон. Об интерферирующих световых волнах мы говорим, что математическое описание сообщает нам шансы того, что фотон попадает в определенную часть картины: самые низкие шансы соответствуют темной полосе, самые высокие — светлой. Для связанных электронов в стабильных состояниях атомов у нас есть утверждение о стоячих волнах, которые описывают

Другие картины круговых волн, соответствующие стабильным состояниям электрона в атоме

[*Низший уровень („основное состояние“) и следующий за ним трудно изобразить*]



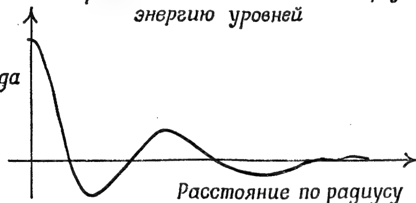


и т.д. ......

Эта картина в другом масштабе

Радиальные картины

Наряду с картинами круговых волн в нашем распоряжении есть радиальные картины, которые указывают вероятность нахождения электрона на различных расстояниях и помогают определить энергию уровней

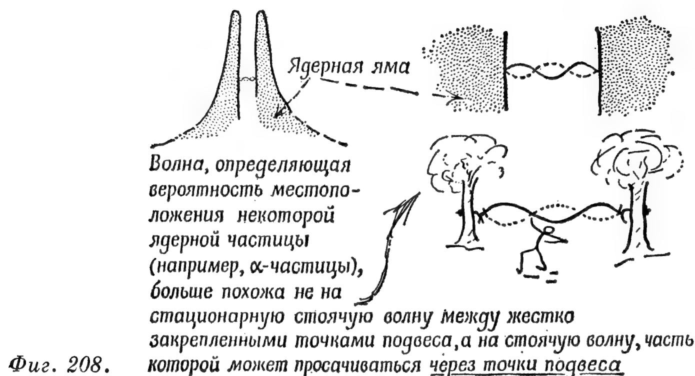




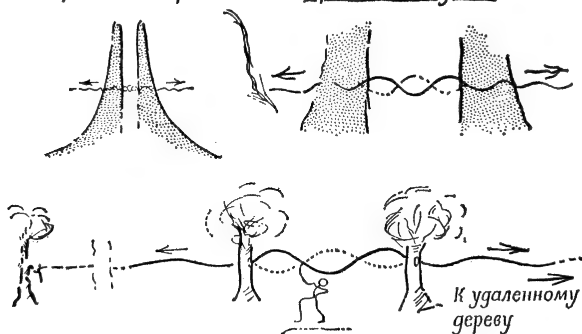
Фиг. 207. Другие волновые картины атомных моделей.

только облако вероятности распределения электронов: *наиболее вероятно* здесь, *вероятно* там, *менее вероятно* во всех других местах.

Точно так же облако вероятности имеется внутри радиоактивного ядра, например для группы нуклонов α-частицы: вероятность того, что α-частица находится внутри, велика, но, так как волны вероятности распределены во всем пространстве, у α-частицы имеются некоторые шансы оказаться снаружи. В один прекрасный

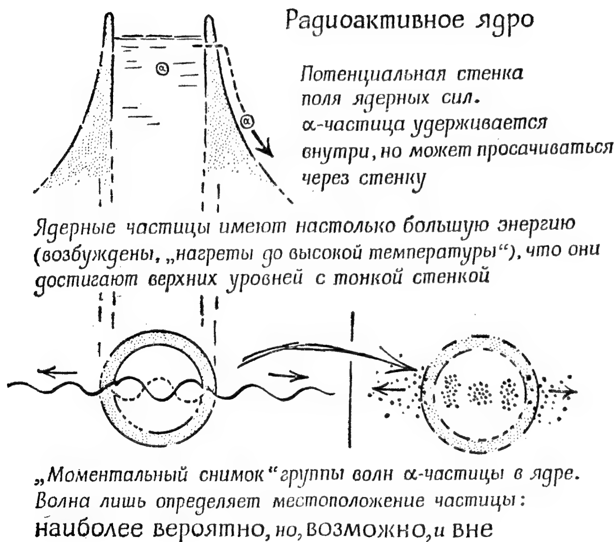


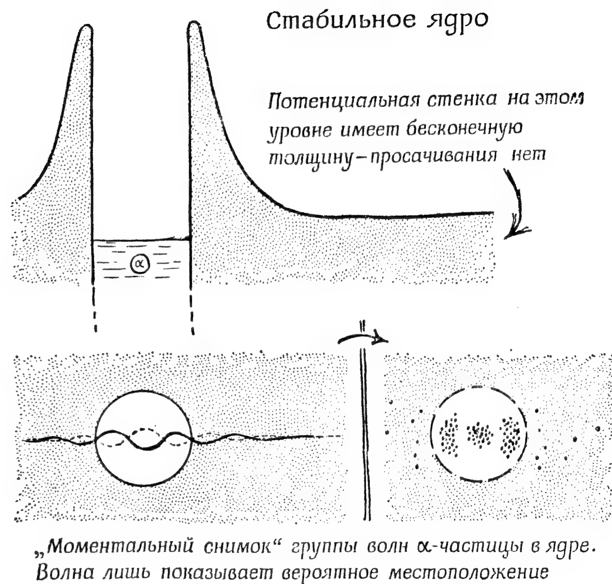
Фиг. 208.



момент она воспользуется этими шансами; тогда она уже снаружи, и после этого электрическое поле выбрасывает ее вдаль. Это грубое, вульгаризованное «объяснение» радиоактивности.

Новое рассмотрение атомов оказалось точным, но отнюдь не простым. При более детальной разработке идея о волнах становится более плодотворной, но сами волны от этого не становятся более реальными. Для их описания мы имеем хороший математический аппарат, но не имеем модели для интерпретации результа-





Фиг. 209. Волновые картины в ядрах.

тов. По существу модели оказались обреченными на неудачу, поскольку они часто вводят в заблуждение. Наша картина атомов и их поведения осталась *математической* моделью — сложной моделью с зацепляющимися друг за друга частями, которая приводит к плодотворным результатам. Поэтому мы вверяем атомную теорию математикам. Они развили новые средства, например сложную алгебру с нетривиальными правилами [1]. Несмотря на странность методов, результаты превосходны и во всех перечисленных ниже пунктах подтверждаются экспериментальными проверками:

Волновой формализм дает для сложных атомов уровни энергии и вероятности нахождения электрона на каждом уровне; это приводит к успешным предсказаниям частот спектральных линий и их яркостей.

При описании молекул как комбинации атомов волновой формализм предсказывает химические энергии и силы поверхностного натяжения. Он даже предсказывает углы и расстояния между атомами в длинных молекулярных цепях, что подтверждается измерениями с помощью рентгеновских лучей.

Вычисленные вероятности нахождения электрона в некоторой области определенного атома согласуются с измерениями рассеяния потока электронов на атомных электронах в мишени из таких атомов.

Кинетическая энергия α-частиц сообщает нам их длину волны. Это дает вероятность их просачивания через ядерный барьер, что позволяет с определенным успехом предсказать период полураспада радиоактивного ядра.

Но нам приходится оставить аппарат всей этой плодотворной теории в математической форме: мы не можем предложить хорошей модели, в которой все казалось бы «разумным». Мы возвращаемся к детской аргументации «потому что это так» или к взгляду древних греков «это в природе вещей». Как и у древних греков, у наших физиков-атомников есть четкие правила — правила квантования и симметрии, правила, которые работают,— но для них нет первопричины. Сформулировав несколько правил, сказать: «Здесь записано, как ведет себя природа»,— вместо того, чтобы во всем обвинять сотни демонов разных мастей,— это все-таки хорошая наука. С этих пор люди, работающие сейчас в физике, оказались разделенными на занимающихся теорией и занимающихся экспериментом. Экспериментатор продолжает исследовать, проверять предсказания, искать новые явления, часто с помощью большой дорогостоящей аппаратуры, для своих непрямых атак на субмикроскопический мир атомов и ядер. Физик-теоретик использует

---

[1] Чтобы проследить за соответствующим рассмотрением, нам нужны такие математические средства, излагать которые здесь у нас нет возможности. Этим объясняются смутность и неясность нашего описания, которое не определяет точно новую теорию.

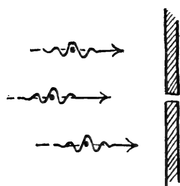
надежные математические методы, избегая думать на языке моделей, к которым склонны более практичные умы. Среди тех и других мы находим великих мыслителей и мудрейших ученых, которые могут объединять теорию и эксперимент и продвигать вперед наше понимание природы.

Принцип неопределенности

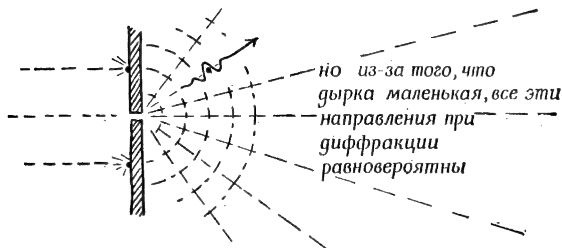
Если движение электрона представляет собой распространение его собственной волны, то при желании точно зафиксировать его положение возникает такое же затруднение, как и в случае камеры-обскуры со слишком малым отверстием. Стреляйте пучком электронов через узкое отверстие в стенке: узкий пучок пройдет через него. Но сделайте-ка отверстие еще меньше, такое, чтобы его диаметр по величине сравнялся с длиной волны электрона: пучок прошедших электронов разойдется во все стороны. Он *обязан* так сделать. Это не есть отклонение, вызванное ближайшими атомами стенки, от которого можно избавиться: это происходит вследствие волновой природы электрона. Попробуйте предсказать, что произойдет дальше с электроном, прошедшим за стенку, и вы, как ни странно, оказываетесь бессильными. Вам точно известно, в каком месте он пересекает стенку, но сказать, какой при этом импульс в поперечном направлении он приобретет, вы не можете. Наоборот, если вы желаете точно определить его импульс и с уверенностью утверждаете «он появится с импульсом mv в первоначальном направлении, вот и все», то для этого вы должны увеличить отверстие настолько, чтобы электронная волна проходила прямо, лишь слабо расходясь во все стороны из-за дифракции. Но тогда вы точно не знаете, в каком же месте электрон-частица прошел через стенку: отверстие-то широкое. Насколько выигрываешь в точности определения импульса, настолько проигрываешь в точности, с какой известно его положение.

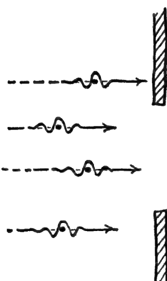
Предельную точность, нам доступную, можно найти из соотношения $\lambda = h/mv$. Из общей теории распространения волн следует, что если волна проходит через отверстие диаметром, равным λ или меньше, то она при этом полностью расходится во все стороны; волна же, прошедшая через отверстие диаметром несколько десятков длин волн или еще больше, проходит практически не расходясь (см. гл. 10). Если зафиксировать положение движущейся частицы у стенки с точностью до нескольких длин волн λ, то при этом есть риск сообщить ей в поперечном направлении импульс, составляющий большую, но *неизвестную* часть от его первоначаль-

„Принцип неопределенности“



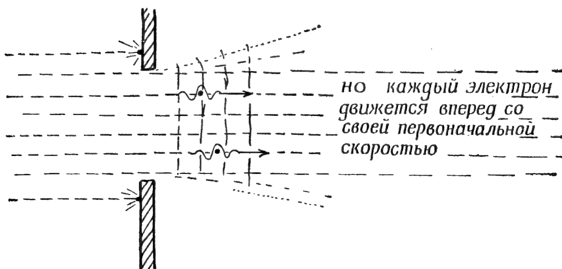
Мы знаем, что из электронов, приходящих к одной стороне экрана, пройдут лишь те, что попадут в эту точку,





Мы не можем сказать, в каком месте широкой дырки прошел через экран тот электрон, который мы наблюдаем,

Фиг. 210.



ного, направленного вдоль его движения импульса mv. Если же достаточно знать положение частицы грубо, с точностью до нескольких десятков длин волн λ, то за счет такой жертвы ее конечный импульс будет известен с точностью до величины, составляющей малую часть начального импульса.

Приводимая ниже таблица содержит утверждения, выглядящие более строгими, чем они есть на самом деле, однако в ней приведены результаты полного исследования с учетом детальной геометрии волн.

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ КООРДИНАТЫ	НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИМПУЛЬСА	ПРОИЗВЕДЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ
(«В *каком* месте прошел электрон через экран? Как велико отверстие?»)	(«Насколько быстро он будет двигаться за экраном и в каком направлении? Каким *импульсом* в поперечном направлении он может обладать?»)	«Можно ли сформулировать какое-нибудь простое правило?»
Δx	$\Delta (mv)$	$(\Delta x)\,(\Delta mv)$
Много λ, скажем $N\lambda$	Малая часть импульса mv, скажем $(1/N)\,mv$	$(N\lambda)\cdot(1/Nmv)=\lambda\cdot mv$
Несколько λ, скажем 3λ	Часть mv, скажем $(^1/_3)\,mv$	$(3\lambda)\cdot(^1/_3\,mv)=$ $=(h/mv)\cdot mv$
Примерно λ	Примерно весь импульс mv	$(\lambda)\cdot(mv)=h$ в каждом случае

Это грубые утверждения относительно точности нашего знания. Однако детальное рассмотрение приводит к тому же самому выводу: в каждом случае произведение неопределенностей равно $\lambda\cdot mv$, т. е. $(h/mv)\cdot(mv)=h$.

$$\left(\begin{array}{c}\text{НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ}\\ \text{КООРДИНАТЫ } \Delta x\end{array}\right)\cdot\left(\begin{array}{c}\text{НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ}\\ \text{ИМПУЛЬСА } \Delta (mv)\end{array}\right)\approx\left(\begin{array}{c}\text{КВАНТОВАЯ}\\ \text{ПОСТОЯННАЯ } h\end{array}\right).$$

Эти неопределенности отвечают разным измерениям: неопределенность одного измерения приводит к появлению неопределен-

ности в другом. Чем точнее производится одно измерение, тем с меньшей точностью можно предсказать результат другого измерения. Неопределенность возникает не вследствие плохой аппаратуры: она лежит в самой природе. Процесс измерения одной величины обязательно ухудшает возможности точного измерения другой. Так как каждая из этих неопределенностей отражает неточность нашего знания, то последнее обязательно в какой-то степени является неточным. Поэтому не следует говорить, что произведение $(\Delta x)\cdot(\Delta mv)$ точно равно h, скорее следует говорить, что оно примерно равно h или «порядка h».

Это и есть *принцип неопределенности* Гейзенберга. Он сыграл исключительно важную роль при построении математического аппарата для описания волн-частиц в атомах. Его строгое толкование в опытах с электронами таково: подобно световым волнам электроны сопротивляются любым попыткам выполнить измерения с предельной точностью. Этот принцип меняет и картину атома Бора. Можно определить точно импульс электрона (а следовательно, и его уровень энергии) на какой-нибудь его орбите, но при этом его местонахождение будет абсолютно неизвестно: ничего нельзя сказать о том, где он находится. Отсюда ясно, что рисовать себе четкую орбиту электрона и помечать его на ней в виде кружочка лишено какого-либо смысла.

Еще более кардинальные изменения вносит принцип неопределенности в философское мировоззрение. *Нельзя* получить знание с предельной точностью, которую мы желаем, причем дело тут вовсе не в разуме, терпении, технике или деньгах. Мысленно можно построить сверхмикроскоп для наблюдения электрона. Будет ли тогда уверенность, что координаты и импульс электрона одновременно измеримы? Нет. В любом таком микроскопе для наблюдения должен использоваться тот или иной «свет». Вообще, чтобы «увидеть» электрон, в таком сверхмикроскопе на электроне должен рассеяться хотя бы один квант «света». Такое столкновение приводило бы к изменению движения электрона, вызывая непредсказуемое изменение его импульса (комптон-эффект). И для того, чтобы точно определить местоположение электрона, «свет» должен быть исключительно короткой длины волны, иначе *его* дифракционное изображение размоется. Поэтому этот квант должен быть исключительно коротковолновым, крайне высокочастотным: это должен быть гигантский квант, фотон γ-лучей. Но в таком случае столкновение будет сильным и импульс отдачи электрона окажется весьма неопределенным. Подробные вычисления на основе соответствующих выражений для импульса отдачи в

комптон-эффекте и теории дифракции света в микроскопе дают $\Delta x \cdot \Delta(mv) \approx h$.

Подобным же образом этот объективно существующий закон неопределенности работает в случае энергии и времени. Нельзя абсолютно точно измерить кинетическую энергию частицы за бесконечно малый отрезок времени. Неопределенность нашего знания энергии ΔE и интервала времени ее измерения Δt связаны следующим образом:

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim h\ ^{1)}.$$

Во всех приведенных выше соотношениях неопределенностей даже знак $\approx$ является слишком точным. Следует говорить $\Delta x \cdot \Delta mv \sim h$ (примерно такой же величины, как h). Но даже в такой формулировке это *лучшее*, на что можно надеяться. Поэтому следует говорить «примерно такой же величины, как ... или больше [2]».

Этот малый квант *действия* h играет роль как бы площади дыр в той частой сети, с помощью которой мы желаем выловить информацию в природе. «Клетка точности» вокруг какого-либо куска информации, который мы хотим поймать, должна иметь площадь большую, чем h, иначе улова не будет. Пытаясь поймать какую-нибудь подробную информацию, можно растянуть нашу сеть в каком-нибудь одном аспекте и сузить ее дыры, однако при этом дыры станут длиннее в другом отношении. Подробность, если

---

[1] Докажем это соотношение для фотона следующим образом: пусть квант света имеет энергию $E = h\nu = mc^2$ и импульс mc или E/c, где m — его масса.

Следовательно, неопределенность импульса составляет

$$\Delta(mc) = \Delta\left(\frac{E}{c}\right).$$

Скорость фотона равна c; следовательно, если проделанный им путь известен с точностью $\Delta(x)$, то время известно с точностью $\Delta(t) = \Delta(x)/c$.

Следовательно, неопределенность $\Delta(x) = c\Delta(t)$. Отсюда

$$\Delta(mc) \cdot \Delta(x) = \Delta\left(\frac{E}{c}\right) \cdot c\Delta(t) = \Delta(E)\ \Delta t.$$

Если $\Delta(mv) \cdot \Delta(x) \sim h$, то тогда $\Delta(E) \cdot \Delta(t) \sim h$.

Если энергия фотона (и, следовательно, его частота и длина волны) измеряется достаточно точно, скажем с точностью 1%, то $\Delta(E) = E/100$ и $\Delta(t)$ должна быть больше $h/(E/100)$, или $100h/E$ $100h/h\nu$, или $100/\nu$, т. е. 100 полных периодов колебаний волны. Для измерения E (или ν) с точностью 1% необходимо затратить такое время.

[2] Анализ того лучшего, на что можно надеяться, иногда приводит к соотношению $\Delta x \cdot \Delta(mv) \approx h/2\pi$, т. е. в лучшем случае к выигрышу на множитель, равный 6.

можно так выразиться, узкая в «ширину», должна быть достаточно велика в «длину», иначе она ускользнет через дыры. Нельзя измерить точно и одновременно величину импульса и координаты: можно только точно измерить одну из них, однако за счет ухудшения знания о другой.

Отсюда ясно, что аппаратура экспериментатора и направление его поиска жестко определяются вопросом, который он изучает. Решив осуществить какое-либо измерение, он тем самым теряет надежду узнать результат точного другого измерения. Это утверждение не звучит как обычное извинение начинающего профессионального ученого: «экспериментальная ошибка», или «вероятная ошибка $\pm$ столько-то процентов для данного прибора». Это есть результат всегда существующего, неустранимого взаимодействия прибора и наблюдателя.

На подобное ограничение в биологии уже давно было обращено внимание Г. Дж. Уэллсом: зоолог, экспериментирующий с живым организмом, никогда не имеет дело с абсолютно здоровым, нормальным экземпляром, поскольку сам акт экспериментирования приводит к изменениям в организме исследуемого существа. Современные биологи и те, кто занимается опросом населения, а также все психологи сталкиваются с аналогичным эффектом.

Это ограничение точности физических экспериментов оставалось неосознанным, пока экспериментаторы имели дело с большими телами, состоящими из большого числа атомов. Для таких тел статистические средние (которые мы, жалкие экспериментаторы, обычно наблюдаем) сглаживают флуктуации и дают нам величины, удовлетворяющие строгим законам [1].

---

[1] Для приборов в человеческий рост неопределенность Δx может оказаться лишь ничтожной долей высоты объекта, а неопределенность $\Delta(mv)$ — ничтожной частью его импульса (напомним, что масса объекта огромна), и тем не менее их произведение будет во много раз больше h. Например, попробуйте произвести измерения над бейсбольным мячом, масса которого 0,2 *кг*, движущегося со скоростью 3 *м/сек*. Предположим, что его положение удалось определить с точностью до длины волны зеленого света (лучшее, что можно получить с помощью оптического микроскопа). Тогда неопределенность Δx равна 5000 Å, или $5 \cdot 10^{-7}$ *м*. Далее, предположим, что время его полета на расстояние 1 *м* нами определяется с точностью до 1/1 000 000 *сек* (максимум, на что можно надеяться для такого большого объекта). Тогда точность, с какой известна его скорость, составляет 3/1 000 000, т. е. $3 \cdot 10^{-6}$. Тогда точность определения импульса также составляет 3/1 000 000, или $3 \cdot 10^{-6}$ измеренной величины, $0{,}2 \cdot 3$ *кг·м/сек*. Следовательно, $\Delta(mv) \approx 2 \cdot 10^{-6}$. При этом $\Delta(x) \times \Delta(mv) \approx (5 \cdot 10^{-7}) \cdot (2 \cdot 10^{-6}) \approx 10^{-12}$. В любом случае нельзя получить это произведение меньшим, чем $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$. В данном примере это произведение получилось в тысячу миллиард миллиардов раз больше его минимальной ве-

Вы уже встречались с эффектом такого сглаживания в случае постоянного давления. Подумайте, однако, что если бы физические эксперименты могла проводить бацилла, то она дала бы совершенно иное описание природы: поверхностные силы перевешивали бы силы гравитации, броуновское движение было бы всеобъемлющим, фотоны бы действовали поодиночке или попарно. Если бы мы могли сами непосредственно это наблюдать, можно было бы еще надеяться видеть и предсказать эти иррегулярности, но при переходе к еще меньшему масштабу — масштабу отдельного атома — *присущая* природе связь неопределенностей действовала бы в полную силу и препятствовала бы нашему настойчивому любопытству.

Неопределенность и корпускулярно-волновая природа

Если в некоторый момент времени точно замерить местоположение электрона, то это уничтожит все шансы точно измерить его скорость. Это в новой формулировке отражает свойственный природе дуализм волна — частица. Если решено точно измерить скорость электрона, то это позволит определить его импульс и длину волны, важную характеристику последней. Длина волны электрона находится путем измерения длинной последовательности волн (длинного цуга волн), что отрезает путь к рассмотрению электрона в виде компактной частицы и, следовательно, его положения. Если, наоборот, определяется его положение, то тем самым подразумевается, что электрон — частица, и оставляется в стороне вопрос о его волновой природе, что уничтожает возможность что-либо сказать об его импульсе. (См. фиг. 272 из ч. I, иллюстрирующую это.)

личины: нет даже намека на подобное ограничение. Просто мы встречаемся с некоторыми экспериментальными трудностями, которые можно преодолеть.

С другой стороны, возьмем электрон, вылетающий из электронной пушки со скоростью $6 \cdot 10^6$ *м/сек* под действием напряжения 100 *в*. Попытайтесь сделать так, чтобы диаметр его трека составлял один атомный диаметр, т. е. $\Delta x \approx 10^{-10}$ *м*, и измерить его скорость с 10%-ной точностью, т. е. с точностью до $0{,}6 \cdot 10^6$ *м/сек*. Тогда

$$\Delta(mv) \approx (\text{масса } 9 \cdot 10^{-31} \text{ кг}) \cdot (\Delta v,\ 0{,}6 \cdot 10^6 \text{ м/сек}) \approx 5 \cdot 10^{-25},$$

$$\Delta x \cdot \Delta(mv) \approx 10^{-10} \cdot 5 \cdot 10^{-25}, \text{ или меньше чем } 0{,}001\ h.$$

Здесь наши надежды зашли слишком далеко. Нельзя зафиксировать путь электрона с точностью до одного атомного диаметра и одновременно измерить скорость с точностью, большей 10%. Это как раз и есть неустранимая неопределенность.

Это не безнадежное противоречие между человеком и природой (до этого далеко!): это всего лишь результат наших попыток *навязать не свойственное природе обличье*. На микроскопическом уровне атомы, электроны и кванты реально ведут себя *не как волны и не как частицы*. Если в поведении объекта стараться видеть корпускулярные черты, так как что-то в нем их нам напоминает, то это означает измерение характеристик, которыми электрон и атом обладали бы, если бы они действительно были частицами. Человек всегда пытался рисовать себе богов в человеческом обличье. Теперь же он пытается навязать атомам образы его собственных развлечений: мячей, капель воды, океанских волн...

Принцип дополнительности

На основании ранних экспериментов и упрощающих предположений были сформулированы законы Ньютона, уравнения Максвелла, теория относительности, которые довольно хорошо описывают поведение больших движущихся масс, зарядов и т. д. Затем было предположено, что эти представления годятся и для электронов, ядер, квантов... Точнее, поскольку непосредственный контакт с микромиром отсутствует, люди *предпочли* применить в этой области макроскопические законы, не зная, подходят ли они или нет, и затем вынуждены получать следствия. Теперь мы видим, что неразумно спрашивать, верны или нет эти законы. Можно предположить, что они верны, и тогда мы получаем взгляд на природу, открывающийся в этом предположении (если спросить: «Насколько шторм свиреп?», то можно ответить — «Очень свирепый». Но было бы неразумно отсюда заключить, что у штормов есть характер). Что бы ни представлял собой микромир в действительности — а это «в действительности» может само по себе быть макрочеловеческой ошибкой, — это не есть мир волн или частиц. Втиснутый в рамки волнового описания вопросом о волнах мир дает волновой ответ и игнорирует частицы. Или, будучи спрошенным о частице, он дает ответ, игнорирующий волновую природу частиц. Но это не природа, которая вешает занавес перед фактами о частице, когда ей задают вопрос о волновой природе. Это всего лишь наши вопросы, которые принуждают рядиться не-волну-не-частицу — электрон в неудобную волновую одежду или в одинаково не подходящую ей одежду частицы. Фактически волновая картина использует «для корректного описания *не электрон, а состояние знания об электроне*»[1].

---

[1] Джон А. Уилер.

Люди достаточно умны, чтобы не задавать переполненные предположениями вопросы слишком грубо, однако сознают, что в тех случаях, когда два противоречащих друг другу описания могут быть по отдельности пригодными, то

а) описания взаимно дополняют друг друга: каждое из них «верно», если интересоваться одним определенным свойством материи;

б) описания взаимно исключают друг друга: если используется одно из них, нечего надеяться применить другое с тем же успехом.

Это и есть всесильный принцип дополнительности Бора, сформулированный им следующим образом (слово «классический» относится к традиционным законам старой устоявшейся физики): «Любое использование классических представлений немедленно приводит к отказу от использования других классических представлений, в разных аспектах одинаково необходимых для объяснения явления» [1].

Для того чтобы почувствовать, что такое принцип дополнительности, ниже предлагаются четыре коротких вымышленных примера.

ПЕРВЫЙ ПРИМЕР. Предположим, что вам дали игрушечный «атом», вылепленный из куска глины. Если бы вас попросили определить «длину» этого «атома», то вы могли бы скатать глину в «колбаску» полуметровой длины. Если бы вас спросили о диаметре «атома», вы могли бы подумать о шаре, затем скатать глину в шарик диаметром 5—6 *см* и измерить. Поступая подобным образом, вы не можете ответить сразу на оба вопроса. Эта выдумка показывает тот путь, по которому наш выбор вопроса контролирует способ ответа и который запрещает взаимоисключающие эксперименты. Эта иллюстрация, однако, вводит в заблуждение, так как глина остается у вас в руках и вам никто не запрещает пытаться выполнить оба задания *с одной и той же глиной.*

ВТОРОЙ ПРИМЕР. Предположим, что у вас в руках только что вылупившийся жук, последний из своей разновидности. Если необходимо узнать, как долго могут жить молодые жуки данной разновидности без пищи, можно поместить его в коробку и проверить, сколько он проживет. Если же нужно узнать, за какое время жук удваивает свой вес, находясь на сахарной диете, можно кормить его и наблюдать за его успехами. Однако нельзя проделать оба этих эксперимента с одним и тем же жуком. Оба эксперимента взаимно исключают друг друга. Эта выдумка показывает, как выбор одного вопроса полностью отрезает нам возможность ответить на другой. Данная иллюстрация, однако, также вводит в заблуждение, поскольку это такая ситуация, которая меняет наши планы (надежды), но не поведение природы: оба вопроса нормальны, и мы только искусственно создали видимость трудности.

---

[1] Niels Bohr, Atomic Theory and Description of Nature, Cambridge, 1934.

ТРЕТИЙ ПРИМЕР. Некий нервный вкладчик, вложивший свои сбережения в банк, дрожит за свои деньги и желает убедиться, что они в целости и сохранности. Он пытается удостовериться в этом двумя способами.

а) следит за регулярностью выплаты интересующих его процентов и по ним заключает, что его деньги в банке;

б) ярко представляя себе, как в детстве заглядывал в свою свинку-копилку, иногда заходит в банк и просит показать ему его деньги. Банк соглашается на это, но предупреждает, что так дело дальше не пойдет. (Далее ему объясняют, что, если всем вкладчикам вздумается выдвигать подобные требования, банк вообще не сможет нормально работать.)

Вкладчик с успехом может воспользоваться обоими способами. Однако каждый из этих способов заставляет его отказаться от другого, поскольку выглядит достаточно надежным. Вкладчику приходится изменить свое представление о банковском деле и зарубить себе на носу, что, хотя его деньги и в безопасности, это все же не то, что хранить их у себя в подвале.

ЧЕТВЕРТЫЙ ПРИМЕР. Предположим, имеется маленький ящик вроде спичечной коробки, из которого доносится какое-то поскрипывание. Двум лицам предлагается, не открывая ящик, исследовать, что там внутри. B — любитель-биолог слушает и решает, что внутри ящика сидит насекомое, скорее всего сверчок. Решив так, B может задаться рядом научных вопросов и ответить на них. Он вслушивается в звуки, определяет их тональность и длительность и, зная, что сверчок издает звуки, потирая ножки друг о друга, оценивает (можно себе вообразить) число зазубрин на ножках сверчка и расстояние между ними. Это даже может его навести на мысль о том, к какой разновидности сверчков следует отнести сидящего в ящике. Это хорошая догадка *на основании его гипотезы* — но в своем желании понять, что̀ же внутри ящика, B может не заметить, какое ограничение он накладывает сам на себя своей первой гипотезой.

Между тем E — радиоинженер — смотрит, слушает и решает, что внутри ящика помещен маленький транзисторный передатчик. По размеру ящика и высоте звука он прикидывает (можно себе представить) величину электрической емкости, которая дает такие поскрипывания.

Затем B и E встречаются. Несмотря на коренное различие в объяснении, они соглашаются продолжить эксперимент. Им пока еще не позволяют открыть ящик, но разрешают в щелку капнуть немного машинного масла. Тон скрипа понижается. Биолог B говорит: «Это как раз то, что я предполагал — в вязком масле сверчку тяжелее двигать ногами». Инженер E говорит: «Это разрешает все сомнения — масло, попадая между обкладками конденсатора, всегда увеличивает его емкость, что и должно приводить к понижению высоты звука». Каждый полагает, что эксперимент свидетельствует в пользу его объяснения, но при этом он забывает, что проделанный им опыт получает смысл только в рамках выбранного им самим способа объяснения.

Дополнительность

Дополнительность имеет место во многих областях интеллектуальной деятельности человека: в науке, философии, этике, наконец, в самой жизни. Существует много вещей, обладающих различными, взаимоисключающими друг друга свойствами. На

основании опыта, приобретенного в атомной физике, нельзя утверждать: «это противоречащие друг другу точки зрения». Досадно, что каждое кажется верным, и раздражает, что одна точка зрения полностью отрезает нас от других. Однако тут следует винить доставшуюся нам в наследство от древних греков способность мыслить с помощью категоричных *да* и *нет*. Следует уразуметь, что наше неудовольствие происходит от необходимости вести себя не способом A, не способом B, а неким неизвестным образом, скажем типа A, в случае чего необходимо забыть о способе B. Вместо этого следует научиться иметь в виду обе точки зрения, используя каждую наиболее рациональным образом.

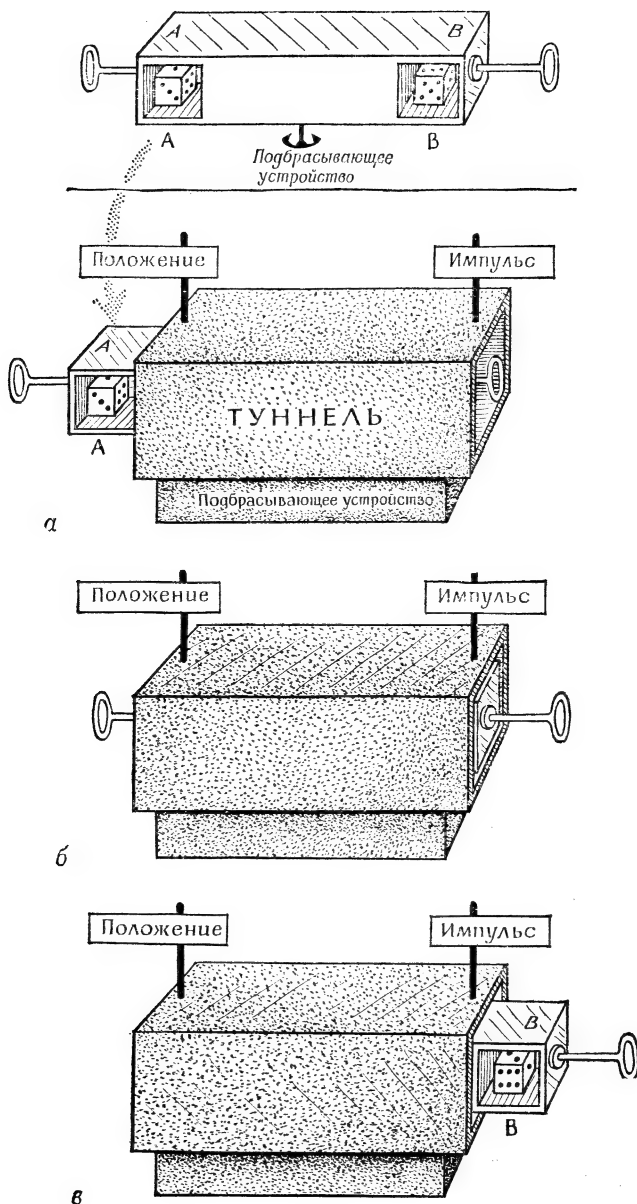
На фиг. 211 изображена модель, служащая для демонстрации дополнительности [1].

Две игральные кости помещены на концах длинного выдвижного ящика AB в отделениях со стеклянными окошками. Выдвижной ящик вставляется в туннель так, что можно вытягивать его то с одного конца, то с другого и видеть кости. Чтобы посмотреть на кость A, нужно вытянуть ящик за конец A. При этом кость A видна, а B — нет. Чтобы посмотреть на кость B, нужно вдвинуть ящик в туннель настолько, чтобы показалась кость B. Движение ящика включает опрокидывающий механизм (расположенный в туннеле), который *подбрасывает вторую кость, когда первая показывается из туннеля.* (Это можно делать рукой, ударяя по резиновому дну ящика.) Механизм включается только тогда, когда ящик проходит больше половины пути через туннель. Так, если полностью вдвинуть ящик в туннель (обе кости внутри туннеля), а затем снова его вытянуть за тот же конец, то число очков на кости окажется тем же самым. Можно вытягивать ящик за конец A сколько угодно раз, но каждый раз будет видна одна и та же грань кости A. Если, однако, ящик вдвинуть поглубже, так чтобы показалась кость B, то можно услышать, как перед этим срабатывает подбрасывающий механизм. После этого уже нельзя с определенностью сказать, какое число очков покажет кость A, когда ее вытащат в следующий раз. Когда видишь, что выпало на одной кости, то не знаешь, что будет на другой.

Это не «модель» в научном понимании, а всего лишь механическая игрушка, демонстрирующая дополнительность. Если концу A сопоставить «ПОЛОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНА» (или «ГДЕ?»), то ко-

---

[1] Построенная, видимо, по предложению Н. Бора для Международной выставки 1939 г. описанная модель представляет собой увеличенную копию модели, сконструированной Боге и Уилером, см. The American Scientist, **44**, № 4, October 1956, «A Septet of Sybils», by J. A. Wheeler.



Фиг. 211. «Игральный ящик» для иллюстрации дополнительности.

нец *B* следует обозначить как «импульс» (или «как быстро?»). Но если концу *A* приписать «кинетическую энергию частицы», то концу *B* следует сопоставить «время». Существует много других пар величин, дополнительных — важных и взаимоисключающих друг друга. Если иметь дело с одной из них, то при этом полностью исключается знание другой. Ниже приведен список таких величин, составленный Уилером:

НАДПИСЬ НА КОНЦЕ *A*, ПОЯСНЯЮЩАЯ, ЧТО ТАКОЕ *A*	НАДПИСЬ НА КОНЦЕ *B*, ПОЯСНЯЮЩАЯ, ЧТО ТАКОЕ *B*
Положение (например, электрона) или *где*?	Импульс (электрона) или *как быстро*?
Энергия (например, электрона)	Время (в течение которого измеряется энергия)
ОПЫТ, ДЕМОНСТРИРУЮЩИЙ волновую природу материи	ОПЫТ, ДЕМОНСТРИРУЮЩИЙ корпускулярную природу материи
Использование слова для передачи *информации*	Анализ *смысла* слова
Любовь одного человека	Правосудие для всех людей

Дополнительность не противопоставляет противоположности, скажем любовь и ненависть, а только объединяет взаимоисключающие свойства одного и того же, такие, как любовь и правосудие. Следует научиться жить с учетом дополнительности.

ЕЩЕ НЕМНОГО ТЕОРИИ

Предсказание новой частицы. Мезон Юкавы

В качестве последнего примера физической теории предлагается проследить, как из корпускулярно-волновой теории вытекает необходимость существования неожиданной субатомной частицы — мезона, представляющего собой нечто среднее между электроном и протоном. (Нижеследующее представляет собой примитивное изложение громадного раздела чистой теории. Способ изложения выбран не наилучший и даже не совсем физический. Его следует скорее рассматривать в качестве наводящего. Вспомните, что зачастую верный подход обнаруживается при грубой попытке рассмотрения вопроса, подобно тому как это делается ниже.)

Тридцать лет назад, когда в рамках новой корпускулярно-волновой физики разрабатывалась структура атомов, структура ядер еще оставалась загадкой, частично разгаданной, а частично неясной, заставлявшей думать о существовании неких неизвестных сил, цементирующих ядро. В атомах электроны и ядра связаны электрическими силами, обратно пропорциональными квадрату расстояния, причем картина волн де-Бройля определяет вероятности их расположения. Внутри же ядра должны существовать другие силы, которые уравновешивают силы электрического отталкивания протонов и заставляют протоны и нейтроны находиться вместе. Действительно, из опытов по рассеянию следует, что такие силы существуют внутри ядра. Когда быстрые α-частицы или протоны налетают на ядра, часть из них при столкновении на близких расстояниях рассеивается назад на большие углы, причем число их оказывается неожиданным. Их оказывается гораздо меньше, чем можно было бы ожидать, если исходить из отталкивания по закону «обратного квадрата расстояния», т. е., видимо, должны действовать новые силы, силы притяжения, причем такие, действие которых ощущается только на очень малых расстояниях от ядра [1]. В модели «холма» потенциальной энергии такие «короткодействующие силы» заставляют кривые потенциальной энергии загибаться вниз и спускаться в кратер. На краю кратера короткодействующие силы притяжения уравновешивают силы электрического отталкивания, действующие на налетающую заряженную частицу. На внешнем склоне «холма» силы скоро обращаются в нуль, внутри же кратера они оказывают исключительно сильное влияние на любую частицу в ядре. Из экспериментов по облучению следует, что для ядер радиус кратера в среднем примерно составляет $1{,}4 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A}$ *м*, где A — атомный вес. Будем называть это расстояние радиусом ядра r. Следовательно, относительно *радиуса действия* ядерных сил нам уже что-то известно. По измеренным энергиям связи можно было бы оценить *размеры* ядра при плотной упаковке. Однако истинная природа или механизм их действия оставались неизвестными, и никто не представлял себе, как связать их с макромиром.

В 1935 г. японский физик Юкава выдвинул потрясающее предположение: внутри ядра всегда находятся некие субатомные части-

[1] Здесь дается очень упрощенная и не совсем правильная картина рассеяния. На самом деле все обстоит сложнее. В частности, при больших углах рассеяния и больших энергиях вероятность рассеяния увеличивается по сравнению с той, которую следовало бы ожидать при электростатическом взаимодействии частиц. — *Прим. ред.*

цы, которые испускаются одними нуклонами и поглощаются другими. О таком «процессе обмена» ранее никто не догадывался. Если бы подобные частицы обладали подходящей массой и в некоторых случаях зарядом, то обмен ими объяснял бы ядерные силы. (Это нечто вроде эффекта связи двух ненавидящих друг друга партнеров по теннису через теннисный мяч. Пока мяч носится по корту, партнеры остаются на теннисной площадке.) Картина таких «обменных сил» следует из теоретической схемы, построенной физиками-теоретиками для «объяснения» обычных электрических сил, таких, как силы электрического отталкивания двух электронов. Рассмотрим вначале эту схему.

Как электроны отталкивают друг друга? Можно говорить, что каждый из них действует на другой посредством электрического поля. Однако для объяснения связи, существующей между электрическим полем и электроном, в настоящее время в качестве необходимого компонента привлекают фотоны. Когда электрон, движущийся ускоренно, излучает (или поглощает) фотон, то между излучением и электроном происходит обмен энергией и импульсом, в результате чего электрон испытывает действие силы. Если же электрон двигался бы в поле электрических сил без ускорения, то физики-теоретики и в этом случае могли бы сказать, что происходит обмен энергией и импульсом через фотоны. Правда, такие «виртуальные» фотоны испускались бы и поглощались столь быстро, что их никогда не удалось бы увидеть. Такие фотоны, «отскакивая» от электрона (или какой-нибудь другой заряженной частицы), уносили бы с собой импульс и создавали бы силу. Тогда это были бы те наблюдаемые силы, которые действуют на заряд со стороны электрического поля. Иногда при ускорении электрона один из таких фотонов вырывается из «связки» и улетает в виде наблюдаемого кванта света. За исключением таких фотонов, виртуальные фотоны не наблюдаемы. Однако можно себе вообразить обмен такими фотонами электронов, когда один из них некоторую малую часть времени (по-видимому, около 1%) проводит в состоянии с большей энергией, поглотив один из таких фотонов. (Если подобная картина для вас выглядит дикой и раздражающе непонятной, вспомните, что это лишь некая теоретическая модель для того, чтобы перенести на атомы наши привычные способы рассуждения. Ее использование плодотворно, она позволяет делать предсказания и расширяет круг наших представлений.)

Юкава пытался найти механизм, посредством которого протоны и нейтроны удерживаются в ядрах. Эти силы ведут себя различно на разных расстояниях: с увеличением расстояния они уменьша-

ются от громадных значений внутри ядра до пренебрежимо малых значений сразу вне «кратера», причем гораздо быстрее, чем по закону $1/r^2$. Юкава убедился, что частицы с нулевой массой покоя, такие, как фотон, не могли бы играть роль связующего агента для таких сил. Чтобы объяснить известные об этих силах экспериментальные сведения, необходимо было приписать частицам некоторую массу покоя. Такие частицы могли бы обеспечить ядерные силы, рождаясь, переходя к другому нуклону и поглощаясь им прежде, чем самый искусный экспериментатор успевал бы заметить какие-либо изменения энергии. Попытаемся здесь дать оценку массы такой частицы. (Опираясь на твердо установленный в настоящее время факт, что такие частицы действительно существуют, будем использовать для этой частицы ее современное название — «мезон».)

Представим себе, что возникший мезон перед тем, как поглотиться, успевает в течение короткого времени совершить несколько оборотов над краем ядерной ямы — подобно электрону на боровской орбите, но с гораздо меньшими размерами. (Ниже будут рассмотрены другие предположения о волновом поведении мезона.) Для существования такой «орбиты» волна де-Бройля должна представлять собой стоячую волну в форме окружности радиусом r, причем в простейшем случае на длине этой окружности $2\pi r$ должна укладываться одна длина волны λ. Тогда

$$\lambda = 2\pi r.$$

Поскольку для любой частицы $\lambda = h/mv$, то отсюда $mv = h/2\pi r$.

Выше только говорилось о частице (не заботясь о деталях), масса же ее m и скорость v остаются неизвестными. Если сказать, что v равно c, то ясно, что это будет переоценка (если, конечно, только частица не является фотоном, масса покоя которого равна нулю, а скорость точно равна c). Если же сказать, что m равна массе покоя мезона m_0, то это будет недооценкой. Для грубой прикидки скомбинируем оба эти приближения, надеясь, что при этом неточности скомпенсируются: напишем m_0c вместо mv и получим

$$m_0 c = \frac{h}{2\pi r}.$$

Отсюда $m_0 = h/2\pi rc$, и величину m_0 можно оценить по известным значениям h, c и оценке радиуса ядра $r \approx 1{,}4 \cdot 10^{-15}$ *м*:

$$m_0 \approx \frac{6{,}62 \cdot 10^{-34}\ \text{дж} \cdot \text{сек}}{2 \cdot 3{,}14 \cdot (3{,}0 \cdot 10^{8}\ \text{м/сек}) \cdot (1{,}4 \cdot 10^{-15}\ \text{м})} \approx 250 \cdot 10^{-30}\ \text{кг}.$$

Сравните это значение с массой покоя электрона, равной примерно $0{,}9 \cdot 10^{-30}$ *кг*. Чтобы успеть просуществовать (недолго) в ядре и обеспечить соответствующие силы связи на соответствующих расстояниях, «обменная» частица должна обладать массой покоя в несколько сот электронных масс. Это означает, что она должна быть в 5 или 10 раз легче, чем самый легкий атом.

Вскоре после этого предсказания, казавшегося столь странным и фантастическим, промежуточные частицы были обнаружены среди треков, оставленных космическими лучами в камере Вильсона. Вначале это выглядело как поразительное подтверждение предсказания — даже величина массы была примерно правильной. Затем оказалось, что у новых частиц, явно нестабильных, время полураспада и другие характеристики не согласовывались с предсказаниями теории. Однако последующие экспериментальные поиски привели к обнаружению еще большего числа разных частиц. Некоторые из них оказались такими, какими их предсказал Юкава, и, как теперь думают, играют в ядрах роль необходимого связующего материала. В настоящее время для дальнейшего изучения можно создавать на ускорителях самые разнообразные мезоны, причем свободные, вне ядер.

Мезоны как вполне реальные частицы в настоящее время стали привычным понятием в субатомной физике. Мезонная теория играет важную роль в ядерной физике. Измерения мезонных масс ($\sim$270 электронных масс) [1] подтвердили гипотезу Юкавы, высказанную тогда, когда таких частиц никто не наблюдал и о существовании которых никто не догадывался.

[Замечания по поводу других моделей волнового поведения мезона в ядре:

1) Картина стоячей кольцевой волны выглядит слишком надуманной. С физической точки зрения лучше представлять себе мезон блуждающим внутри кратера потенциальной ядерной ямы. В этом случае представление о стоячей волне де-Бройля было бы более похожим на задачу о колеблющейся струне. При этом предположении простейшая стоячая волна должна иметь нулевую амплитуду на краях ямы (здесь располагаются узлы волны). При этом $^1/_2\,\lambda$ равна диаметру ядерного кратера, равному $2r$, или $\lambda = 4r$ вместо $\lambda = 2\pi r$.

---

[1] Более легкие мезоны (210 электронных масс), которые были обнаружены первыми, ведут себя несколько иначе, скорее всего как тяжелые нестабильные электроны.

2) При более последовательном рассмотрении нет необходимости привлекать ни волны, ни яму, а следует исходить из принципа неопределенности в том его виде, в котором он формулируется для энергии и времени:

$$\Delta E \cdot \Delta t = \frac{h}{2\pi} \text{ (по крайней мере).}$$

Пусть один нуклон в ядре испускает мезон и передает его какому-нибудь другому нуклону, отстоящему от первого на расстояние где-то между 0 и $2r$. Изменение энергии ΔE, т. е. ее неопределенность в данный момент времени, равна энергии, затраченной на образование мезона, т. е. m_0c^2. Предположим, что свой путь до другого нуклона, в среднем равный r, мезон проходит со скоростью c. На это уходит время, равное $\Delta t = r/c$. Если мезон живет достаточно долго, успевая пройти этот путь и оставаясь незамеченным экспериментатором, то $\Delta E \cdot \Delta t$ должно в точности равняться $h/2\pi$, и, следовательно,

$$(m_0c^2)\frac{r}{c} = \frac{h}{2\pi}\ .$$

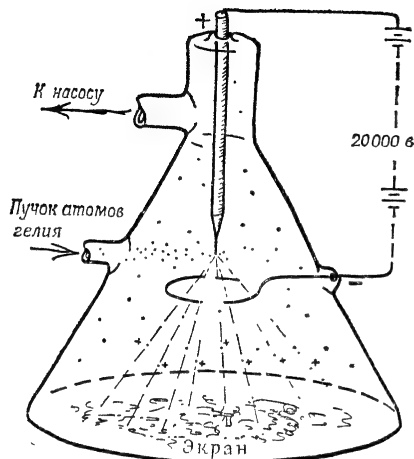
Отсюда следует ранее найденная оценка массы мезона $m_0 = h/2\pi rc$.]

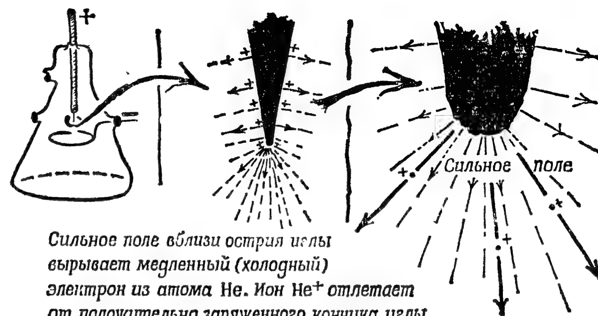
ЕЩЕ ОДИН ЭКСПЕРИМЕНТ

Видимые атомы

Для того чтобы ознакомиться с последним в этой главе разделом экспериментальной физики, оставим фантазирование и посмотрим на фотоснимки отдельных атомов, хитроумные способы получения которых теперь можно обсудить с техническими подробностями. На фиг. 215 изображена фотография атомов, расположенных на самом острие вольфрамовой иглы. Изображение создается ионами гелия, рассеянными острием иглы, на флуоресцирующем экране. На фиг. 212 показана установка, сконструированная Эрвином Мюллером [1]. Очень острая вольфрамовая игла помещается в центре стеклянной колбы, внутри которой имеется хороший вакуум при незначительном содержании газа гелия. Между нитью и опоясывающим ее металлическим кольцом радиусом r прикладывается высокая разность потенциалов. Так как игла очень острая, электрическое *поле* вблизи ее острого конца

[1] Точное описание прибора см. в статье самого проф. Мюллера, Scientific American, 196, 113, June 1957, в которой приведен целый ряд других снимков и диаграмм.

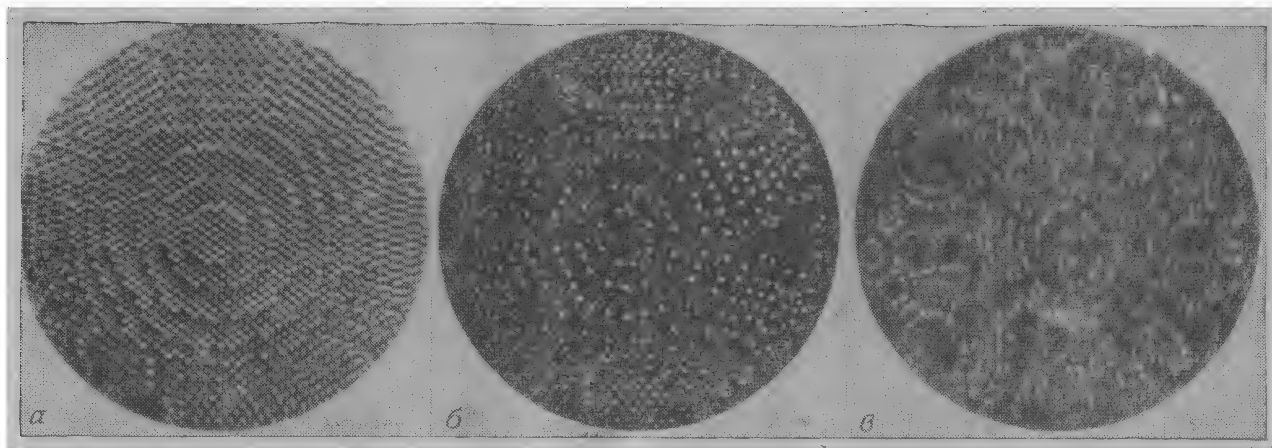






Фиг. 212. Ионный микроскоп Мюллера для наблюдения атомов.

На рисунках даны простейший вид прибора и пояснения принципа его действия. Для более подробного ознакомления см. Scientific American, 196, June 1957.



Фиг. 213. Интерпретация изображения острия иглы в ионном микроскопе. (Из Scientific American, ***196****, June 1957.)*

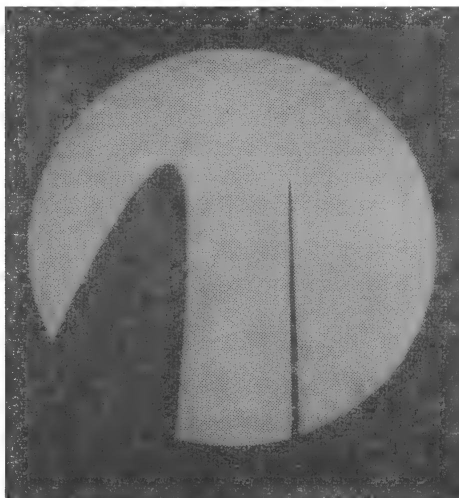
а — модель из уложенных слоями пробковых шариков для воспроизведения картины расположения атомных слоев на конце очень острой вольфрамовой иглы; *б* — *крайние* шарики каждого слоя модели *а* были покрашены флуоресцирующим веществом, способным светиться в ультрафиолетовом свете; здесь приведена фотография этой модели в ультрафиолетовом свете; *в* — фотография, сделанная с помощью ионного микроскопа. Изображение создается ионами, летящими с острия вольфрамовой иглы.

исключительно велико. Оно настолько велико, что способно у атома гелия, проходящего мимо острия иглы, вырвать электрон [1]. Образовавшийся ион ускоряется электрическим полем. Он летит от поверхности по прямой и падает на круглый экран, покрытый флуоресцирующей краской, заставляя экран светиться при ударе. (Падающий на экран ион выбивает в краске электроны, а когда атомы вещества краски обретают их снова, то они высвечиваются.) Электрическое поле вблизи острия иглы особенно велико, причем силовые линии поля выходят из поверхности (в той степени, в какой о поверхности можно говорить в атомном масштабе) в перпендикулярном к ней направлении. Поэтому ионы ускоряются этим полем в направлении, перпендикулярном поверхности. На некотором отдалении от острия, там, где поле слабее, скорость и направление движения ионов уже меняются слабо. Поэтому вспышки на экране от ударов ионов в точности воспроизводят увеличенную картину расположения точек, с которых они стартовали на поверхности острия. Там, где на поверхности иглы имеются заострения, электрическое поле у поверхности ее очень сильное и способно создавать и ускорять большую часть ионов гелия. Следовательно, яркое пятно на экране соответствует заострениям или ребрам на поверхности иглы.

---

[1] Можно произвести грубую оценку электрического поля путем следующих рассуждений. Угадаем сначала, каков «радиус» конца иглы. Учитывая, что атомы образуют слои (поглядев на само изображение), догадываемся, что последние слои содержат по меньшей мере дюжину атомов, причем каждый слой лежит на таком же другом, но на один атом шире и т. д. Тогда уже из простого рисунка видно, что радиус острия, выглядящего грубым и «угловатым» в атомном масштабе, равен примерно 30 атомным диаметрам $30\times\times 3$ Å $\approx 100\cdot 10^{-10}$ *м*. Атом гелия мал, диаметр его меньше чем 1 Å. Примем его радиус равным $^1/_4$ Å. Нам известно, что энергия, необходимая для удаления одного электрона, примерно равна 25 *эв*. Следовательно, для того чтобы оторвать электрон от атома гелия и увести его на бесконечность, необходима разность потенциалов 25 *в*, причем бо́льшая часть ее должна приходиться на близкие расстояния от атома, где велико поле, создаваемое ядром. Острие вольфрамовой иглы «закруглено», причем радиус закругления в 400 раз больше. Поэтому для создания вокруг него точно такого же поля, как вокруг атома, разность потенциалов между острием и бесконечностью должна быть в 400 раз больше, т. е. должна равняться $400\cdot 25$ *в*, или 10 000 *в*. Реально между иглой и кольцом прикладывается несколько десятков тысяч вольт. (Большая часть этой разности потенциалов приходится на ближайшую окрестность острия, скажем на расстояние порядка одного радиуса. При этом напряженность поля равна 10 000 $в/100\cdot 10^{-10}$ *м*, или 10^{12} *в/м*. На расстоянии, равном радиусу атома гелия, это поле дает $[10^{12}$ *в/м*$]$ $[^1/_4\cdot 10^{-10}$ *м*$]$, или 25 *в*, т. е. как раз ту разность потенциалов, которая необходима для ионизации атома. Проведенный расчет, разумеется, представляет собой замаскированный вариант первоначального, но только проведенный в обратном направлении.)

Теперь вообразим себе иглу в атомном масштабе. Ее «конец» представляет собой последний слой атомов вольфрама, который лежит на чуточку более широком слое атомов, а тот в свою очередь



Фиг. 214. Вид острия вольфрамовой иглы (помещаемой в ионный микроскоп) и обычной острой иглы (слева) в обычном оптическом микроскопе.
Фотография Эрвина В. Мюллера.

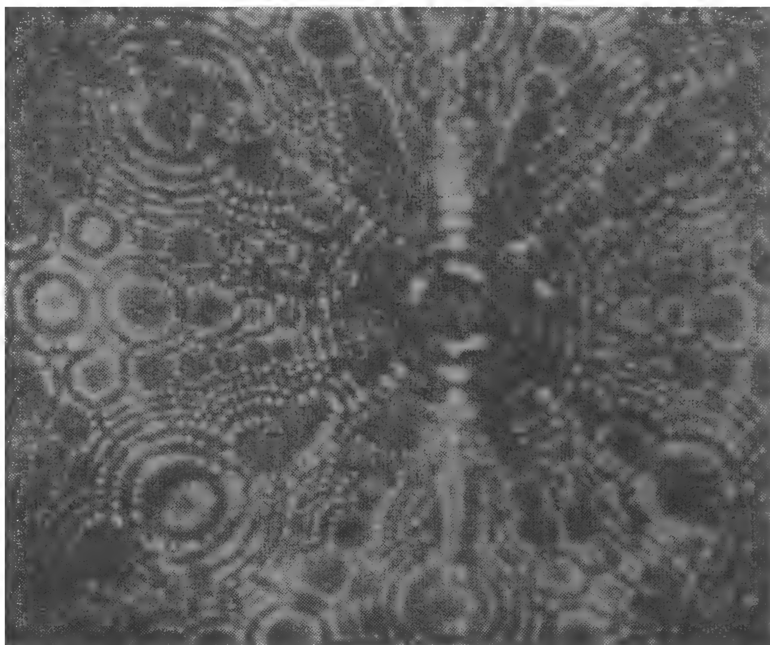
лежит на еще более широком слое и т. д. Острие может быть столь острым, что последний слой состоит всего лишь из десятка атомов или несколько большего числа их. Однако даже в этом случае атомам гелия конец иглы не представляется очень острым. Что уж действительно выглядит острым, так это *края* слоев атомов, те места, где какой-нибудь слой обрывается и «поверхность» образует ступеньку между поверхностями соседних слоев.

Картина дифракции рентгеновских лучей говорит о том, что металлический вольфрам кристаллизуется в виде регулярной последовательности атомных слоев, напоминающей аккуратно сложенную горку апельсинов или древних пушечных ядер. На фиг. 213, *а* изображена модель такой упорядоченной горки, сделанная из маленьких пробковых шариков. Точно так же, как на конце острия иглы, в этой горке у каждого слоя имеются боковые грани, причем каждый следующий слой на несколько шариков шире. Пометив крайние шарики каждого слоя, можно предсказать, какое изображение будет давать острие настоящей иглы из вольфрама.

Все крайние шарики на модели были закрашены флуоресцирующей краской, светящейся в ультрафиолетовом свете. На фиг. 213, *б*

приведена фотография этой модели, сделанная в ультрафиолетовом свете. Сравнивая ее с фиг. 213, *в*, сделанной с помощью настоящей установки, можно убедиться, что картина, создаваемая пучком атомов гелия, отражает подлинную картину послойного расположения атомов вольфрама.

Такие эксперименты должны выполняться при очень низких температурах, иначе собственное движение атомов гелия будет вносить заметные искажения,— желательно, чтобы ионы двигались только за счет электрического поля. Кроме того, при обычных температурах атомы гелия, по-видимому, рассеиваются на атомах вольфрама без последующей ионизации: для ионизации, вероятно, необходимо их более длительное пребывание в электрическом поле, а это имеет место лишь тогда, когда ионы движутся медленно.



Фиг. 215. Фотография острия вольфрамовой иглы, сделанная на ионном микроскопе.

Фотография передает картину расположения атомных слоев на кончике иглы и ее боковых сторонах (увеличение 3 000 000). (Фотография Эрвина В. Мюллера, Пенсильванский университет.)

Поэтому аппаратура охлаждается жидким водородом (спокойно кипящим в сосуде с кипящим азотом). При этом изображение таково, как на фиг. 215.

Если дать вольфраму чуть-чуть нагреться, то картина еще остается прежней, но при этом *видно* движение некоторых атомов вольфрама: видно, как некоторые из них мигрируют и испаряются.

Правильно ли сказать: «На этой фотографии я вижу сами атомы непосредственно»? Это зависит от уровня вашего мышления. Если вы не знаете, что такое электрическое поле, что такое распределение заряда и поля вблизи острия, что такое ионизация, средняя длина свободного пробега, свечение экрана... вы, наверное, скажете: «Какое там непосредственно! Эта картина — всего лишь какая-то система пятен плюс туманные рассуждения насчет атомов».

Однако, будучи уже знакомым с достижениями науки, вы можете с уверенностью воскликнуть: «Да, я вижу сами атомы!» И за этим утверждением будет скрываться обретенное вами глубокое понимание.

ЛЮДИ НАУКИ

Ученые

Я надеюсь, что здесь, в конце курса, вы поразмышляете об ученых и о том, ради чего они делают открытия и объясняют их. Пифагор... Птолемей... Коперник... Тихо... Кеплер... Галилей... Ньютон... Джоуль... Максвелл... Резерфорд... Эйнштейн... де-Бройль... Бор — все они сделали великие открытия, все внесли вклад скорее в наше интеллектуальное богатство, чем в житейские блага или успехи, и то, что они дали нам, составляет непреходящие ценности, достающиеся бесчисленным поколениям.

При взгляде в будущее мы видим обширную область фактов, законов, теорий, предположений — научные знания,— которая будет увеличиваться все больше и, как мы надеемся, будет стремиться к завершенности. Это изучение природы — составляющая часть интеллектуальной жизни человека — приносит удовлетворение всем ученым. Наука в их руках — это не только деятельность по собиранию фактов, или установлению законов, или выбору направления экспериментов. Это прежде всего *искусство* чувствовать, как лучше выбрать точку зрения или наиболее подходящее направление исследований, чтобы расширить понимание природы. Чистая наука — погоня за знаниями и пониманием природы — всегда будет удовольствием. Что же, ученые в их башне из слоновой кости, башне из экспериментов и теорий работают лишь

для себя, ничего не давая остальному человечеству, подобно безмолвным поэтам в уединении? Ответ мыслителя: «Нет, они прибавляют человеку интеллектуальные возможности». Ответ практика: «Нет, ученые полезны, поскольку со временем их открытия используются в технике». Но сегодня существует новая группа исследователей-*инженеров*, которые соединяют деятельность ученого и инженера, и наш вопрос становится более общим. В каком вообще соотношении по их значению для человечества находятся ученые, инженеры и инженеры-физики?

Ученые и инженеры

Наука дает технике возможность развиваться и процветать. Современный *инженер* [1], используя научные знания, выполняет великолепную работу и всюду необходим. Лет сто назад хороший инженер опирался главным образом на огромные запасы опыта эмпирического экспериментирования и изучения методом проб и ошибок, унаследованного от предыдущих поколений. Но теперь, когда потребности и методы усложнились и меняются более быстро, хорошие инженеры опираются непосредственно на научные знания. Это изменение состоит в современной технике в уменьшении «степени эмпиризма», как ее назвал Джеймс Б. Конант [2]. Для инженеров это означает продвижение вперед, но оно делает их более зависимыми от помощи ученых. Они теперь используют так много научных материалов, сконцентрированных в компактные формулы или таблицы в справочниках, что остается слишком мало времени для изучения их источников; поэтому им приходится либо принимать эти материалы на веру, либо консультироваться у научных советников.

Современный инженер-физик — творческий инженер или ученый-прикладник — объединяет в себе инженерное искусство с основательными знаниями науки. Он обладает творческими способностями и вооружен научными знаниями вплоть до последних достижений. По своей подготовке и роду занятий он — ученый, но его интересуют больше новые применения науки, чем сами новые достижения науки. Таким образом, инженер-физик занимается *интерполяцией* в той или иной области существующей науки,

---

[1] Разумеется, инженер и ученый иногда объединяются в одном человеке — тогда эти замечания относятся к нему в каждой роли отдельно.

[2] См. его превосходную книгу On Understanding Science (Yale Univ. Press, New Haven, 1947).

тогда как чистый ученый по своему призванию стремится к достижению новых знаний и более глубокого понимания и, стало быть, пытается провести *экстраполяцию*. С учетом этого отличия цивилизация должна была бы оценивать чистых ученых наравне с поэтами и артистами. Все ученые так или иначе вносят вклад в интеллектуальное и эмоциональное развитие человека.

Однако у практика остаются вопросы: «Инженер-физик использует все науки как зерно для своей мельницы, и он энергично работает над развитием самой науки. Почему же тогда при наличии многих лучших умов, занимающихся технической физикой, необходимы чистые ученые?» Я думаю, на это существует ответ: «Ученый в своей башне из слоновой кости вносит такой вклад, без которого не может обойтись в течение длительного времени ни нация, ни цивилизация: он обеспечивает интеллектуальной пищей следующее поколение ученых и инженеров. Техническая физика, подобно мулу, обладает силой и умом, но не может воспроизвести подобное себе следующее поколение. Причина в том, что следующему поколению первоклассных инженеров-физиков необходимы свежие взгляды и знания и новая мудрость, если они хотят работать как творцы, а не как обычные технические руководители. И эти свежие взгляды появляются из философских интересов, которые поддерживают и развивают ученые». Чистый ученый обязательно в какой-то мере философ; он размышляет над своими собственными мыслями, критически рассматривает свои собственные эксперименты и приобретает общий взгляд на свою науку. Он знает кое-что о том, *на чем основаны его знания*; он немного знает о том, *что он знает*, и он всегда ясно может сказать, *чего он не знает*. И в возрастании своего знания он находит глубокое удовлетворение.

Квалифицированный ученый

Что делает ученого *специалистом* по сравнению с непрофессионалом? Каждый из нас является непрофессионалом, любителем и дилетантом во всех областях, за исключением нашей собственной. Мы в состоянии изучить правила и использовать их, забывая о том, что мы не профессионалы, но мы делаем с ними серьезные ошибки. Неученый может купить маленькую книгу, в которой сообщаются «все законы физики»,— он может даже пересчитать наиболее важные из них на пальцах двух рук. Профессиональный физик знает законов не больше — он может помнить даже

меньшее число законов, поскольку он полагается на книги, которые напомнят то, что потребуется ему, но он держит в уме два обширных комментария к фактам, законам, принципам... два комментария, которые являются продуктом его образования, опыта и размышлений.

1. Он знает ограниченность каждого факта или закона, пределы его применимости, смысл его терминов, он имеет широкие представления о его связях с реальным материалом. Такие знания образуют то, что мы называем «маленькой черной записной книжкой в кармане ученого»,— символ богатого опыта, имеющегося у ученого и отличающего его от осведомленного непрофессионала, который может цитировать законы, но не умеет надежно их использовать. (Он знает, например, что в некоторой формуле изгиба балки P — это *напряжение*, а не *сила*, что формула применима лишь при малых растяжениях и много бо́льших сжатиях. Он никогда не спутает P с силой и не применит формулу к дереву, которое изгибается и раскалывается совершенно иначе. Аналогично он знает, *почему* закон Бойля применим для газов при очень низких давлениях, поэтому он не будет ожидать, что этот закон останется справедливым также при очень низких температурах.) Эту записную книжку можно назвать «ДЕТАЛЬНЫЕ ЗНАНИЯ И ПОНИМАНИЕ».
2. Далее мы видим, что каждый хороший ученый имеет другую «записную книжку», которая сообщает ему, каким образом взаимосвязаны его конкретные знания. Ее объем очень велик, неограничен. Ее можно назвать «ТЕОРИЯ».

Обладание этими двумя воображаемыми записными книжками достигается в процессе обучения, что делает ученого специалистом. Как образованный неспециалист вы можете идти дальше вперед, чтобы присоединиться к ученым, если вы понимаете, как он пользуется этими «записными книжками».

Гений и чудак

Каждому из нас — будь то ученый, инженер или неспециалист — доводилось встречать энтузиастов, предлагающих новые научные взгляды — не изобретения или хитроумные приспособления, а революционизирующую теорию. Как отличить блестящее достижение от нелепого вздора? Все можно нарядить так, чтобы это выглядело привлекательным и разумным для постороннего

человека. Больше того, все может выглядеть обещающим успех и вполне возможным даже в глазах специалиста. Мы *все* делаем ошибки при распознавании «чудаков»: мы смеемся над непризнанными гениями или преклоняемся перед бессмыслицей, облеченной в звонкие фразы; но ученый, с его развитым чутьем к своему искусству, имеет наилучшие шансы отличить пророка от чудака. Мудрость ученого основана на прошлых знаниях, но сам он глядит в будущее. Инженеру-физику, смотрящему главным образом в настоящее и прошлое, труднее отличить пророка от чудака.

Чудак — это зачастую искренний ученый по своим намерениям, а временами и по образованию, который стремится к новым взглядам, что уводит его от последовательного познания природы. В его смелых размышлениях и мыслях нет вреда — они свойственны и хорошей науке,— опасна его некритическая уверенность в своей правоте. Если ученый *экстраполирует*, а инженер *интерполирует*, то чудак *предполагает и верит эмоционально, с закрытыми глазами*. Весьма курьезно, но энтузиазм чудака заражает многих неспециалистов тем же самым слепым доверием. Мы надеемся, что, хотя эта книга и не сделает вас специалистом, ваши глаза будут открыты.

Удивление и восхищение. Интеллектуальный прогресс

Вместо сильного эмоционального убеждения, что его взгляды на природу — это истина в последней инстанции, для ученого главное чувство состоит в наслаждении поисками и достижением более широкого понимания природы. Его главная забота — *рост* знаний, а не их хранение. Он разделяет с нашими древними предками ощущение любопытства и чувство удивления и восхищения; он расширяет их до огромного чувства интеллектуального прогресса. У вас есть возможность разделить с ним это чувство.

Вы и Наука

Итак, наше рассмотрение физики в этом курсе прошло полный цикл, вернувшись к исходным вопросам *о причинах, объяснениях, об эксперименте и теории*. Вы не получите четкого заключения, говорящего, что́ следует называть «правильной» наукой; по существу, вам преподнесли еще более неоконченное, чем вначале, обсуждение этого вопроса; осталось еще больше знаний, требующих развития. Но сжатое воспоминание об упорядоченных фактах должно теперь выглядеть менее важным, чем чувство, что вы по-

нимаете ученых и их работу, или чем убеждение, что *наука имеет смысл как часть мудрости человечества*.

Если вам доставляет удовольствие наблюдать за научными поисками, а у вас в душе остались некоторые вопросы для дальнейших размышлений; если вы получаете удовольствие от встреч, споров и работы с учеными; если вам нравится экспериментировать; если вы можете отличить «отважный консерватизм» теоретика от безбрежного энтузиазма «чудака», а прежде всего, если вы будете больше иногда читать о науке для себя как образованного человека, живущего в век науки,— тогда этот курс сделал свое дело.

Будущее науки — и практических знаний, и интеллектуального богатства — сильно зависит от отношения неспециалистов: родителей, учителей, должностных лиц, членов правительства... всех образованных людей; поэтому поддерживать доброе имя науки — дело рук каждого из вас как членов научной цивилизации.

ОБЩИЕ ЗАДАЧИ

В этом разделе собраны вопросы и задачи по материалам нескольких глав и, быть может, даже всей книги в целом. Задачи, помещенные перед гл. 1, и большинство задач и вопросов из других глав тоже входят в этот раздел, поэтому безразлично, откуда решать задачи на определенную тему.

Задачи этого раздела играют важную роль в обучении, в особенности на более поздней стадии курса. Здесь содержатся: списки небольших статей для обзоров; некоторые общие задачи (или образцы «экзаменационных вопросов»), в которых требуется дать описания, вычисления, обоснования или выдвинуть смелую гипотезу; некоторые вопросы, требующие значительного времени для обдумывания и отвечать на которые нужно скорее изложением своего мнения, чем односложным «правильным ответом». В разделе помещено также несколько очерков.

Там, где требуется обосновать ответ, сделать это намного важнее, чем дать сам ответ. Большие несложные рисунки сэкономят ваше время, сделают ответ более ясным и покажут, что вы поняли, как используют диаграммы ученые. Те вопросы, которые требуют короткого ответа, снабжены указанием такого типа: «напишите 3 строчки» или «~3 строчки».

ТЕРМИНЫ И ЕДИНИЦЫ

1. Для каждого понятия а) дайте короткое определение или описание, четко объясняющее, что это такое (~ 2 строчки; лучше использовать слова, а не символы); б) укажите их обычные единицы в системе СИ (основанной на метре, килограмме, секунде):

а) скорость,
б) ускорение,
в) плотность,
г) удельный вес,
д) сила,
е) импульс,
ж) вес,
з) масса,
и) напряжение,
к) деформация,
л) давление,
м) длина волны,
н) частота,
о) ток, поток,
п) сопротивление,
р) заряд,
с) кинетическая энергия,
т) Р. П. (разность потенциалов),
у) э. д. с. (электродвижущая сила),
ф) напряженность гравитационного поля,
х) напряженность электрического поля,
ц) краевой угол (включите рисунок),
ч) длина свободного пробега молекул газа,
ш) постоянная Планка,
э) отношение e/m для атомной частицы.

2. Напишите короткую заметку, определяющую, описывающую или объясняющую каждое из следующих понятий (~3 строчки для каждого):

а) равноденствие,
б) планета,
в) комета,
г) полярная звезда,
д) квадрант (инструмент),
е) параллакс,
ж) плоскость эклиптики.

3. В каждом случае, данном ниже, ясно показать, что две *единицы*, используемые там, совпадают или по крайней мере эквивалентны:

а) Напряженность электрического поля может быть измерена в *в/м* или *ньютон/кулон*.
б) Напряженность гравитационного поля, измеренная в *ньютон/кг*, дается ускорением в *м/сек*^{2}.
в) Изменение момента количества движения в *кг·м/сек* создает импульс в *ньютон·сек*.
г) Поверхностное натяжение в *ньютон/м* (сила натяжения на единицу длины кромки мениска) есть в то же время механическая энергия в *дж/м*^{2}, необходимая для того, чтобы создать единицу площади новой поверхности.
д) Скорость диссипации энергии в сопротивлении обычно выражается в ваттах, но может быть выражена и в *а*^{2}*·ом* (используя соотношение $P=I^2R$).

4. Назовите физическую величину, для измерения которой используется каждая из нижеуказанных единиц, и дайте ее значение в общепринятой системе единиц СИ:
(Пример: 1 Å — единица *длины*. Она равна 10^{-10} *м*.)

а) 1 *эв*; б) 1 *квт·час*; в) 1 световой год.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ЗНАНИЯ

5. Опишите известные вам эксперименты (или те, которые демонстрировались вам на лекциях, или которые вы делали сами в лабораториях), показывающие, что:
а) импульс в столкновениях (даже неупругих) сохраняется,
б) постоянная сила создает постоянное ускорение.

6. Дайте короткий перечень экспериментов, которые встречались вам раньше, для любых трех из указанных ниже случаев, объяснив, как были получены результаты (~1 страница для каждого из трех случаев):

1) измерение радиуса Земли,
2) использование движения Луны в проверке гравитационного закона обратных квадратов,
3) измерение расстояния между Луной и Землей,
4) измерение расстояния между Венерой и Солнцем в единицах расстояния между Солнцем и Землей,
5) измерение величины гравитационной постоянной G, входящей в соотношение $F=GM_1M_2/d^2$.

СВЕДЕНИЯ О МОЛЕКУЛАХ

7. Какая количественная или качественная информация о молекулах содержится в каждом из нижеследующих пунктов? (Не отвечайте одним словом, а дайте короткое объяснение.)

а) броуновское движение,
б) поверхностное натяжение,
в) диффузия (рассеяние) паров брома,
г) площадь масляной пленки на воде,
д) измерения давления, объема и массы образца воздуха,
е) измерения удельной теплоемкости газа при различных температурах.

8. Напишите короткую заметку (несколько строк), характеризующую вклад каждого из следующих примеров в наши знания об атомах и (или) радиации:
а) рассеяние α-частиц в золоте,
б) картинки треков α-частиц в камере Вильсона, наполненной влажным гелием,
в) измерение e/m для электронов,
г) эксперименты по фотоэлектрическому эффекту,
д) интерференционные полосы Юнга, производимые светом,
е) дифракция рентгеновских лучей на кристаллах,
ж) дифракция электронов на кристаллах никеля,
з) наложение магнитного поля на камеру Вильсона, в которой получают фотографии треков.

9. Коротко опишите, как каждое из следующих экспериментальных открытий повлияло или какой вклад оно внесло в астрономические представления:
а) наблюдения Венеры Галилеем,
б) наблюдение Галилеем пятен на Солнце,
в) открытие Галилеем спутников Юпитера,
г) открытие Урана (1780 г.),
д) открытие Нептуна (1840 г.),
е) очень точные измерения положения Марса, сделанные астрономом Тихо Браге,
ж) измерения Холли и других исследователей, показавшие, что кометы движутся по вытянутым эллипсам.

10. Когда пучок электронов ускоряется в электрическом поле и затем отклоняется в магнитном, можно сделать измерения, которые дадут информацию, касающуюся электронов. Мы не получим величины заряда электрона, но измерения дадут нам другую величину, *одну и ту же для всех электронов* Что это за величина, которую можно рассчитать по результатам этих измерений?

11. Физики часто описывают атомы следующим образом. Атомы малы, их линейные размеры порядка нескольких ангстрем. В них имеется много легко отделяемых электронов с малой массой и отрицательным зарядом. Почти вся масса атомов сконцентрирована в очень маленьких ядрах, которые несут положительный заряд ($+Z$ электронных зарядов, если Z — порядковый номер элемента в периодической системе элементов, где элементы распределены по их атомным весам). Некоторые элементы имеют несколько видов ядер (изотопов) с различными массами, но с тем же самым зарядом. Существуют нестабильные атомы, которые самопроизвольно распадаются, излучая α-частицы, β-лучи и т. д. α-частица — это ядро атома гелия с зарядом $+2e$. Электроны в атомах намного легче ядер (масса каждого составляет $\sim 1/1800$ массы всего атома водорода), несут отрицательные заряды и все одинаковы. Внешние, слабо связанные электроны легко удаляются из атома при облучении его ультрафиолетовым светом. Детали такого описания атомов не являются фантазиями, рожденными воображением, чтобы «объяснить» природу. Это всего лишь набор экспериментальных фактов. Выберите несколько деталей данного выше описания атомов и опишите эксперименты, на которых

они основаны. (Укажите вид использованной аппаратуры. Укажите основной путь, которым можно получить такое описание,— информацию из измерений или наблюдений. Не нужно давать детальных расчетов. Слово «несколько» указывает на значительную свободу выбора. Вы должны описать по крайней мере три различных вида экспериментов.)

КОЛЕБАНИЯ ПРУЖИНЫ

12. Ниже приведены значения длины некоторой стальной пружины, когда к ней подвешены разные грузы:

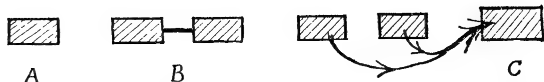
Груз в *кг*	Длина в *м*
0	0,51
0,908	0,58
3,632	0,81

а) Предскажите полную длину пружины при подвешенном грузе массы 1,8 *кг*.
б) Предскажите полную длину пружины при подвешенном грузе 5,45 *кг*.
в) На каких физических соображениях вы основываете предсказания а) и б)?
г) Считаете ли вы оба предсказания а) и б) одинаково надежными? Объясните.
д) Подвешенный к пружине груз 0,9 *кг* оттягивают ниже положения равновесия и затем отпускают. Груз начинает колебаться в вертикальном направлении. Почему можно ожидать, что груз будет совершать простые гармонические колебания?
е) Предскажите значение амплитуды (максимальное смещение груза от положения равновесия в каждом цикле) для простого гармонического колебания, описанного в пункте д).
ж) Укажите четкое основание для вашего предсказания.
з) Предскажите амплитуду простого гармонического колебания, совершаемого подвешенным к пружине грузом 1,8 *кг*.
и) Физик-теоретик замечает, что при ответе на вопрос, содержащийся в пункте д), используются те же аргументы, что и при ответе на вопрос в пункте е); поэтому он пользуется ими и для предсказания амплитуды простых гармонических колебаний, совершаемых грузом 2,7 *кг*. Эксперимент показывает, что это предсказание неверно для определенной пружины с перечисленными свойствами. Предложите объяснение.

ДВИЖЕНИЕ

13. С пятью одинаковыми прямоугольными брусками проделывают следующее:

Один оставляют свободным (тело A), два скрепляют тонким горизонтальным стержнем в виде гантели B, два оставшихся сплавляют вместе в один брусок C той же самой формы и плотности, но больший по величине (фиг. I).



Фиг. I.

а) Когда A, B и C свободно падают в воздухе, они находятся в движении одного типа. Какое вы делаете заключение из этого наблюдения? (~3 строчки).

б) Когда A, B и C падают в воде, каждый из них сначала ускоряется, затем у каждого устанавливается постоянная скорость, которая сохраняется до конца движения. Почему у них устанавливается и затем сохраняется постоянная скорость? (~3 строчки).

в) Падая в воде, A и B достигают одной и той же конечной скорости, в то время как большее тело C — другой.

1) Будет ли скорость тела C больше или меньше скорости A и B?

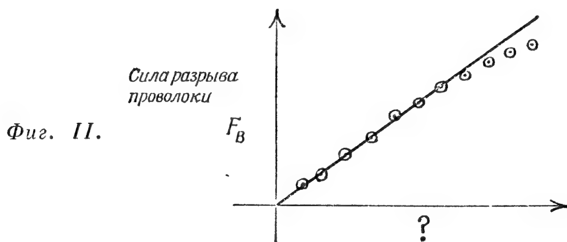
2) Объясните корректно, почему скорость у C другая, чем у A и B.

СИЛА, РАЗРЫВАЮЩАЯ ПРОВОЛОКИ

14. а) Какое соотношение можно предположить, исходя из «здравого смысла», между силой F_B, *разрывающей проволоку, и ее диаметром* d?

б) Предположим, что экспериментатор, измеряющий силу F_B для нескольких стальных проволок разного диаметра, но одинакового состава, хочет изобразить свои измерения в виде графика, точки которого лежат на прямой линии. Если он будет откладывать по оси ординат вверх F_B, то что он должен отложить по оси абсцисс, чтобы получить прямую линию (d, $1/d$, $\sqrt{d}$ и т. д.)?

в) Теперь предположим, что на фиг. II представлены его результаты в виде такого графика. Замечаем, что точки в верхнем правом углу лежат далеко от прямой линии.



Фиг. II.

1) Являются ли эти точки ошибочными? (четко обоснуйте ваш ответ; напишите ~2 строчки).

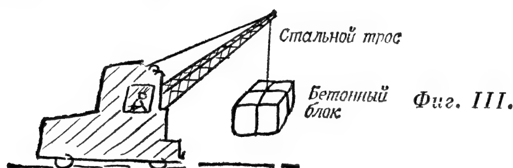
2) Каких размеров проволоки, к которым эти точки относятся: самые толстые, средние или самые тонкие?

г) Предположим, вам сказали, что все стальные проволоки прошли закалку перед измерениями, результаты которых изображены на графике фиг. II, т. е. проволоки сначала нагрели, а затем немедленно поместили в холодное масло. Предложите, выдвигая смелую гипотезу, объяснение положению точек в верхнем правом углу, не уложившихся на прямую линию (напишите ~2 строчки).

д) Приведите доводы, защищающие вашу гипотезу пункта г) (напишите ~3 строчки).
е) Какие эксперименты могут быть испробованы для проверки вашей гипотезы пункта г) (напишите ~5 строчек).

МОДЕЛЬ КРАНА

15. Инженер проектирует кран для поднятия огромных прямоугольных бетонных блоков. Кран поднимает блок с помощью одного стального троса. Чтобы испробовать свой проект, инженер делает модель крана, в которой все детали (включая трос и бетонный блок) сделаны из того же самого материала и имеют ту же форму, что и в проектируемом кране, но все линейные размеры уменьшены в 12 раз.



Фиг. III.

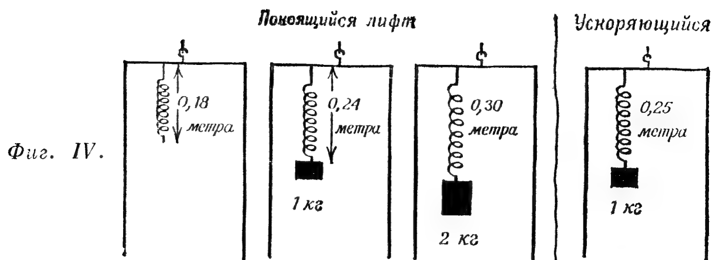
Модель работает хорошо и способна поднять пять бетонных блоков без обрыва троса. Когда реальный кран сделан, оказывается, что при подъеме одного блока трос обрывается. Прокомментируйте и объясните неудачу с краном (~ 5 строчек). Предположите, что материалы модели и крана одинакового качества и полностью термически обработаны.

УМЕЛАЯ ОЦЕНКА

16. Сделав разумные предположения о массе, скорости, времени удара и т. д., оцените силу, действующую на гвоздь, когда его вбивают каким-то средней величины молотком (вам не дают результаты измерений, а просят самих взять их значения, которые вам кажутся разумными, и затем рассчитать ответ). Прежде чем использовать ваши предположения в расчете, вы должны их четко сформулировать. Поскольку вы используете только предположения, приемлем любой разумный ответ, если вы объясните, как его получили.

АКСЕЛЕРОМЕТР

17. К потолку лифта подвешена стальная пружина. Когда она не нагружена, ее длина 0,18 *м*. Если к нижнему концу пружины подвесить груз 1 *кг*, ее длина станет равной 0,24 *м*. Если к грузу добавить еще 1 *кг*, длина пружины будет уже 0,30 *м*. Предположим, что лифт равномерно ускоряется. Когда к пружине подвешен груз 1 *кг*, ее длина в таком ускоряющемся лифте становится равной 0,25 *м* и остается постоянной во все время движения лифта.
а) Как направлено ускорение лифта, вверх или вниз?
б) Лифт движется вверх или вниз?
в) Рассчитайте ускорение лифта. Укажите единицы ускорения.



Фиг. IV.

18. Спортивный автомобиль хорошо известной марки может ускориться из состояния покоя до скорости 100 *км/час* в течение 10 *сек*. Оцените:

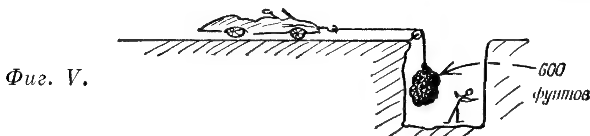
а) Его ускорение.

б) Расстояние, которое требуется, чтобы достичь скорости 100 *км/час*.

в) Чтобы испытать тормоза, у автомобиля, идущего со скоростью 100 *км/час*, выключают мотор и тормозят на горизонтальной дороге. Самое лучшее, что могут сделать тормоза, это остановить автомобиль на дистанции 90 *м*. Вес автомобиля 900 *кГ*. Оцените среднюю тормозящую силу, действующую на автомобиль во время остановки.

г) Какая задача из гл. 7 в основных чертах совпадает с задачей в)? (Замечание: в этом вопросе не требуется найти другой задачи о тормозящем автомобиле или стартующем бегуне. Вас просят проявить гибкость ума и найти задачу, которая формулируется по-другому, но требует того же самого решения.)

д) Те же самые тормоза испытываются в гараже так: мотор у машины выключается (тормоза включены полностью) и машину тянет вперед прикрепленный к ней трос, который перекинут через блок (без трения) и имеет



Фиг. V.

на конце свинцовый или стальной груз. С 272,4-килограммовым железным грузом, висящим на тросе, машина движется с постоянной скоростью юзом. Оцените тормозящую силу.

е) Если ваши ответы на пункты в) и д) не будут согласовываться между собой, укажите причину расхождений, лучшую, чем неправильные измерения.

МАССА И ВЕС

19. Напишите короткую заметку, сопоставляющую *массу* и *вес*. Опишите свойства каждого понятия (~1 страница).

20. Один ученый-чудак, занятый поддержанием путаницы между массой и весом, придумал схему, в которой как силы, так и массы выражены в килограммах, и соотношение $F=ma$ справедливо. Он получил эту ужас-

ную схему, создав специальную единицу длины «звено», которая делает соотношение $F=ma$ справедливым. При этом ускорение измерено в единицах «звено»/*сек*/*сек*.

а) Если чудак производит измерения в Нью-Йорке, 1 «звено»=... метра?

б) Укажите четкое обоснование вашего ответа на вопрос а).

ЗАДАЧА О ШЛАНГЕ

21. Пожарный пускает горизонтальную струю воды на гладкую вертикальную заднюю стенку автофургона 1800 *кГ* весом. Вода, попадая на автофургон, разбрызгивается во все стороны по задней стенке и стекает вниз. Расход шланга 150 *л* в 10 *сек* при горизонтальном истечении воды со скоростью 9 *м*/*сек*.



Фиг. VI.

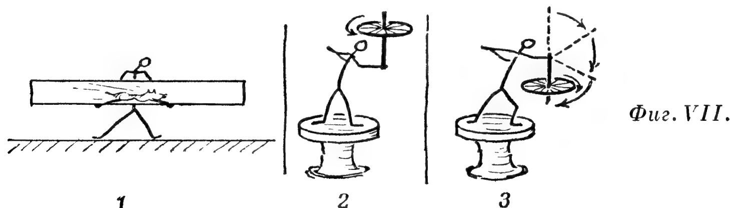
а) Сила, действующая на заднюю стенку автофургона (стоящего на тормозе), равна...?

б) Если тормоз отпущен и автофургон может двигаться по горизонтальной дороге без трения, его ускорение в первый момент будет...?

в) Когда автофургон движется вперед (вся вода еще попадает на его заднюю стенку), его ускорение будет (возрастать? уменьшаться? оставаться тем же самым?), потому что...?

г) Предположим, что теперь пожарный направляет горизонтальную струю воды в открытую дверь в задней стенке автофургона, вся вода попадает внутрь и собирается там. Как можно сравнить ускоренное движение (тормоз отпущен) в этом случае с движением в б) и в), данных выше? Дайте четкое основание (а может быть, основания) ($\sim$ 4 строчки).

22. Человеку, стоящему спокойно на абсолютно гладкой поверхности замерзшего озера, дают длинный ящик, в котором находится зверь, быстро бегающий из одного конца ящика в другой. В тот момент, когда человек



Фиг. VII.

получает ящик, зверь находится на середине пути от одного конца к другому (*1* на фиг. VII). Предположим, вы можете наблюдать, как человек держит ящик (вы не видите, что происходит внутри ящика). (Ящик и человек находятся в покое в первый момент, когда человек его получает.)

а) Увидите ли вы, что человек движется? Если он движется, то как? Обоснуйте ответ.

б) Теперь зверь устал и лег на дно посередине ящика. Как будет двигаться человек?
в) Зависит ли ваш ответ на вопрос б) от того, в какую сторону бежал зверь (справа налево или наоборот) в тот момент, когда он решил остановиться? Почему?
г) Человеку, спокойно стоящему на вращающемся без трения столике, передают (например, сосед, не касаясь его) крутящееся велосипедное колесо, насаженное на вертикальную ось, так, что человек может держать его как зонтик (фиг. VII, *2*). В тот момент, когда он получает колесо, он находится еще в покое. Затем человек кладет вторую руку на ободок и останавливает колесо. Предскажите, что произойдет?
д) Теперь человек, не останавливая колеса, отклоняет ось от вертикального направления (фиг. VII, *3*); сначала ось направляется наклонно вверх, затем горизонтально, затем наклонно вниз и наконец вертикально вниз. Как вы думаете, что произойдет, когда он будет держать его в новом положении все еще вращающимся?
е) Обоснуйте ваш ответ на вопрос д).

ЗАКЛЮЧЕНИЯ

23. а) Детали поверхности Юпитера скрыты тучами, и все же мы знаем, что Юпитер вращается. Какие наблюдения говорят нам об этом? Объясните, как мы можем оценить скорость вращения Юпитера?
б) Мы не видим молекул газа и все-таки знаем, что они быстро движутся. Из каких наблюдений мы это знаем?
в) Мы не можем видеть молекулы, однако нам известно, что молекулы гелия — единичные атомы, а молекулы водорода состоят из пары атомов. Какие *физические* наблюдения или измерения (отличные от *химических* экспериментов и аргументов) говорят нам о том, что молекулы гелия — единичные атомы?

ИСПАРЕНИЕ

24. С открытой поверхности блюдца испаряется жидкость, и вентилятор разгоняет пар.
а) Почему оказывается, что жидкость исчезает в этом случае быстрее, чем когда вентилятор выключен ($\sim$1 строчка)?
б) Почему жидкость исчезает быстрее, если ее подогреть? (*Замечание.* Фраза «Молекулы разлетаются быстрее» не является адекватным объяснением.) ($\sim$3 строчки).

МОЛЕКУЛЫ ВОЗДУХА И ГРАВИТАЦИЯ

25. а) Если барометр поднять на крышу высокого здания, он покажет меньшее давление, а если взобраться с ним на гору, то можно заметить еще бóльшие изменения и т. д. Объясните эти изменения на языке кинетической теории газов ($\sim$2 строчки).
б) Камень, поднятый над землей, снова падает на землю, если дать ему возможность свободно двигаться. Почему с точки зрения кинетической теории газов все молекулы воздуха не падают на землю?

СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ

26. Молекулы воздуха при атмосферном давлении имеют среднюю длину свободного пробега $\sim 10^{-7}$ *м*.

а) Что это значит?

б) Если уменьшить давление воздуха до половины атмосферного при той же самой температуре:

1) Как изменится средняя длина свободного пробега?
2) Будет ли среднее расстояние между молекулами тем же самым, значительно больше или значительно меньше?
3) Какие изменения в трении воздуха можно ожидать (для медленного ламинарного потока)?
4) Укажите четкое основание вашего ответа на вопрос 3.

в) Предположим, что мы можем при атмосферном давлении изменить молекулы так, что у них будет двойной диаметр, но все прочее останется тем же самым: та же масса и т. д.

1) Как изменится средняя длина свободного пробега?
2) Как изменится среднее расстояние между молекулами?
3) Предположим, что вы можете перевести в жидкость какой-то новый газ и сравнить с жидким воздухом. Как вы думаете сравнивать плотности этих двух жидкостей?

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГАЗА (СЛОЖНЫЕ РАССУЖДЕНИЯ)

27. Когда газ уносит тепло от нагретого тела, перенос тепла по большей части осуществляется с помощью конвекции — большие массы газа движутся как целое. Хотя газы и относят к очень плохим проводникам, однако, если конвекция предотвращена, у газов, подобно твердым телам, наблюдается некоторая теплопроводность. (Конвекция может быть предотвращена, если в газ добавить очень мелкие кусочки ваты или коры или когда нагретое тело, имеющее форму горизонтальной пластины, располагается над холодной горизонтальной пластиной так, что между ними находится газ. В последнем устройстве, используемом для измерения теплопроводности газов, конвекции нет либо она ничтожна, так как для осуществления ее должны быть потоки нагретого газа, движущегося вниз.

а) Предложите механизм теплопроводности газа, исходя из кинетической теории газов. (Выдвиньте гипотезу.) (~ 2 строчки.)

б) Пусть у вас имеются два газа A и B, молекулы которых одинаковы в размерах и одинаковы во всем, за исключением того, что масса молекулы газа B в 4 раза больше массы молекулы A. Как можно сравнить теплопроводность двух газов? (Какой из них будет лучшим проводником? Если сможете, скажите, насколько лучшим.)

в) Обоснуйте ваш ответ на вопросы б) (~ 2 строчки).

г) В качестве грубого экспериментального теста сделайте следующее: нагрейте кусок проволоки в воздухе до красного каления электрическим способом, нагретую проволоку погрузите в сосуд с CO_2, а затем в гелий.

ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА

28. Предположим, что Вселенная устроена по-другому и в ней действует закон обратных кубов вместо закона обратных квадратов ($F=GM_1M_2/d^2$).

Тогда I закон Кеплера не должен выполняться: орбиты планет не будут эллипсами.

а) Будет ли справедлив II закон Кеплера (закон равных площадей)? Почему?

б) Какую форму должен принять III закон Кеплера для круговых орбит? (Дайте только алгебраический расчет.)

ЭКСПЕРИМЕНТ С ОРБИТАМИ

29. Предположим, что экспериментатор пытается продемонстрировать I—III законы Кеплера с помощью прибора, показанного на фиг. 110 гл. 21. «Планета» массы M, расположенная на абсолютно гладкой основе из сухого льда, движется по орбите на горизонтальном алюминиевом столе. Она прикреплена к концу натянутой нити, идущей к центру стола, где есть дырка. Через маленький блок (без трения) нить соединена с грузом m, висящим ниже стола. Экспериментатор может начать двигать «планету» по орбите с любым радиусом круговой или другой формы. Он находит, что эти орбиты некруговые и имеют странную форму. Они также и не эллипсы, т. е. I закон Кеплера не применим.

а) Будет ли II закон Кеплера (равных площадей) применим к каким-нибудь орбитам в этом устройстве? ко всем? или ни к каким? Почему?

б) Экспериментатор находит, что для круговых орбит различных размеров III закон Кеплера не справедлив. Отношение R^3/T^2 не одно и то же для всех орбит. Найдите правило, которое будет справедливо для этого устройства, если M и m остаются неизменными.

МАССА ЛУНЫ

30. а) Объясните, почему мы не можем оценить массу Луны (в единицах массы Земли, Солнца и т. д.) так же легко, как массу Юпитера ($\sim$ 2 строчки).

б) Предположим, что к Луне запущен искусственный спутник, который остается вращаться вокруг нее по круговой орбите с малым радиусом. По данным, приведенным ниже, для этого предполагаемого спутника оцените массу Луны в долях массы Земли.

ДАННЫЕ. Период обращения спутника вокруг Луны 6 *час*. Расстояние от центра Луны до спутника видно с Земли под углом 1/100 *рад*; следовательно, радиус орбиты спутника составляет 1/100 расстояния от Луны до Земли. Период обращения Луны (относительно звезд) 27,3 дня.

СИЛА ТЯЖЕСТИ НА ЮПИТЕРЕ

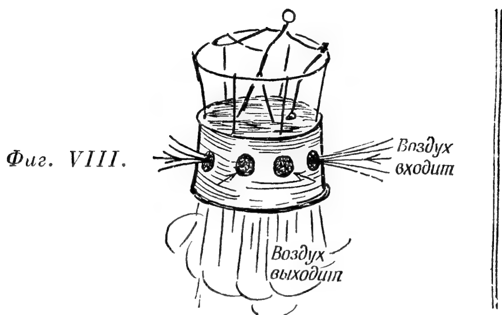
31. а) Сделайте грубые оценки напряженности гравитационного поля на поверхности Юпитера, используя данные, приведенные ниже, и укажите единицы, в которых дан ваш ответ.

Масса Юпитера: около 300 масс Земли.
Радиус Юпитера: около 10 радиусов Земли.

б) Как показывают ваши вычисления, проделанные выше, гравитационное поле на поверхности Юпитера гораздо больше, чем на земной поверхности. Предположим, что Юпитер имеет атмосферу, подходящую для жизни, и на нем развились некоторые виды животных. Как вы считаете, будут ли

самые большие животные Юпитера больше наших самых больших слонов? или такие же? или меньше?
в) Обоснуйте ваш ответ на вопрос б) (~ 4 строчки).

32. Летающая платформа, предназначенная для полета одного человека, состоит из опрокинутого бочонка с огромным пропеллером внутри, который гонит большой поток воздуха вниз. Пилот стоит на крыше бочонка. Пропеллер, установленный внутри, засасывает воздух через дырки в боковых стен-



Фиг. VIII.

ках бочонка внутрь и гонит его через открытое дно вниз со скоростью 15 *м/сек*. Пусть платформа весит 68 *кГ* (металл и топливо), пилот весит 91 *кГ*; следовательно, общий вес системы 159 *кГ*.

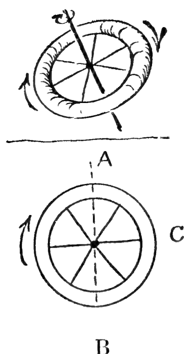
а) Вычислите, сколько воздуха должен прогнать пропеллер за 10 *сек*, чтобы платформа + пилот висели неподвижно в воздухе в течение 10 *сек*. (Полностью объясните ваши вычисления.)

в) Предположим, что скорость пропеллера можно удвоить.
Выскажите ваши соображения по поводу следующего:
I. Как это может отразиться на выходной скорости воздуха?
II. Как это скажется на количестве воздуха, засасываемого пропеллером в одну секунду?
III. Как это должно подействовать на реактивную движущую силу?
IV. В каком движении будут находиться платформа+пилот после этого изменения?
(Если сможете, дайте подробную формулировку.) (~ 2 строчки.)

ФИЗИКА В КОСМИЧЕСКОМ КОРАБЛЕ

33. Пусть в космическое пространство, где нет никаких гравитационных эффектов, запущен огромный космический корабль (имеющий форму согнутой в кольцо трубы радиусом 30 *м* и внутренним диаметром 3 *м*). Снаружи корабля атмосфера отсутствует. Для удобства пассажиров корабль быстро вращается вокруг оси, перпендикулярной плоскости кольца и проходящей через его центр. Пассажиры, находящиеся внутри корабля, замечают, что нить подвешенного маятника располагается вдоль диаметра AB (фиг. IX).

а) Нарисуйте одного маленького пассажира корабля, стоящего на ногах внутри кольца так, чтобы он чувствовал свое положение нормальным около точки A, другого — около точки B и третьего — около C.



Фиг. IX.

б) Один из этих пассажиров держит перед собой яблоко на уровне плеч и затем отпускает его (без подталкивания в каком-то определенном направлении). Опишите движение (если оно будет), каким видит его пассажир. (Используйте слова или рисунок.)

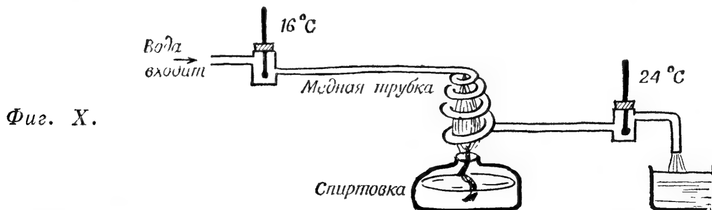
в) Предположим, что корабль прозрачный. Снаружи вблизи корабля находится наблюдатель, который движется поступательно вместе с кораблем, но не вращается. Опишите движение яблока, каким его видит этот внешний наблюдатель. (Если вам нравится, используйте рисунок.)

г) Теперь предположим, что пассажир открывает иллюминатор или люк, отпускает яблоко и наблюдает за ним некоторое время, за которое корабль успевает сделать $^1/_4$ оборота. Какую траекторию, описываемую яблоком, увидит внешний наблюдатель? Какую траекторию увидит пассажир? (Дайте рисунок.)

д) Пусть теперь пассажир отпускает наружу таким же образом, как в пункте г), светящееся яблоко, пережидает несколько оборотов и начинает наблюдать за ним в телескоп. Опишите путь яблока, каким он его видит.

РАСЧЕТ ТОПЛИВА

34. Если бы человек мог жить на одном алкоголе, как много бы ему понадобилось спирта в день при пищевой норме потребления 3000 килокалорий в день? Для своих оценок используйте информацию, которую дает эксперимент, описанный ниже, *и оставьте ваш ответ с множителями без сокращения.*



Фиг. X.

Маленькая лампа равномерно сжигает спирт. Она потребляет 2 *кг* спирта в течение 24-часового дня. Ее пламя окружено свернутой кольцами медной трубкой, по которой непрерывно течет вода, входящая в трубку при темпера-

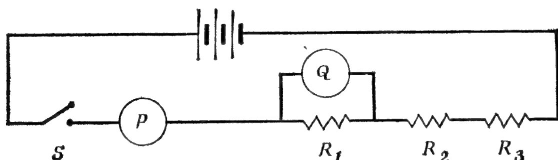
туре 16° С и выходящая из нее при температуре 24° С. По трубке протекает 11 *кг* воды за 10 *мин.* (Трубка очень тесно окружает пламя, так что охлаждение исключается, и все устройство в целом укутано асбестом, т. е. можно считать, что утечка тепла в воздух пренебрежимо мала.)

ЛАБОРАТОРНАЯ ЗАДАЧА

35. Предположим, что в процессе исследования вам понадобилось знать удельную теплоемкость какого-то масла и вы решили оценить ее с помощью маленькой электрической нагревательной спирали. Опишите коротко измерения, которые вы должны проделать, и скажите, как можно вычислить удельную теплоемкость. Предполагается, что у вас есть любой прибор, включая подходящую нагревательную спираль и батарею, но нет вольтметра. (Если вам хочется, можете использовать омметр.) (~ 1/2 страницы.)

ЛАБОРАТОРНЫЕ ВОПРОСЫ

36. В цепи, показанной на фиг. XI, R_1, R_2, R_3 — проволоки одного и того же типа и равной длины. Сопротивление каждой 1 *ом*. В качестве батареи включена 6-вольтовая автомобильная батарея. Сопротивлением всех соеди-



Фиг. XI.

няющих проводов и батареи можно пренебречь. Пусть P и Q — простые измерительные приборы, включаемые для чувствительных измерений.
а) Какой тип прибора P следует использовать?
б) Какой тип прибора Q здесь нужен?
в) Если переключатель S выключен («открыт»), что покажут P и Q?
г) Когда переключатель S включен, что покажут P и Q?
д) Если переключатель S включен, но проволока R_1 удалена или разорвана, что покажут приборы?

НАУЧНЫЕ МЕТОДЫ И ИДЕИ

37. «В построении областей науки теория и эксперимент часто играют дополнительные роли».
Внимательно обсудите это утверждение, иллюстрируя ваше обсуждение примерами из книги.

38. Что подразумевается под законом в науке? (~ 2 страницы.)
(Очевидно, что на этот вопрос нет единого «правильного ответа».) Вас приглашают высказать свое собственное мнение и замечания, скажем, интеллигентному, но не занимающемуся наукой человеку, который задает такие вопросы: что такое законы, почему приборы (или природа) подчиняются им, как они используются, справедливы ли они? Если можно, дайте примеры из этого курса.

39. а) Что вы должны иметь в виду как ученый, если вы характеризуете эксперимент как хороший, или успешный (~ 1 страница)? (Очевидно, что на этот вопрос нет единого «правильного ответа». Вас приглашают высказать свое мнение и заключения, скажем, интеллигентному человеку, не занимающемуся наукой, который говорит: откуда вы знаете, экспериментируете вы или просто играете с приборами, и какая разница между исследованием и обычными техническими измерениями? (Дайте, если хотите, примеры из какой-либо работы, проделанной вами при изучении этого курса.)

б) Несколько лет назад Автодорожное управление разметило несколько необычной системой белых линий полотно дорог, имеющих плохие обочины на поворотах, и расставило знаки: «Автодорожное управление. Экспериментальная маркировка дорог». Обсудите смысл «успеха» такого эксперимента.

40. Напишите реферат на тему одной из предлагаемых пар видов деятельности. Сравните в ваших рассуждениях: используемые методы, ценность того, что вы достигаете, предмет и цель деятельности.

1) Физика и поэзия.
2) Физика и история.
3) Физика и критика (литературная, музыкальная и т. п.).

41. Каковы, по вашему мнению, основные задачи и функции теоретической физики?

При ответе на этот вопрос обсудите некоторые из следующих примеров:

Резерфордовская картина атома.
Кинетическая теория газов.
Теория относительности.
Ранние работы по радиоактивности или рентгеновским лучам (из самостоятельного чтения).

42. Обратитесь к книгам:

«A History of Science» by sir William Dampier,
«Out of My Later Years» by Albert Einstein,
«Experiment and Theory in Physics» by Max Born,
«The Edge of Objectivity» by Charles Gillispie

и другим книгам по философии науки. Затем напишите короткий реферат, отвечающий своими словами на вопрос: какие задачи у теоретической физики?

НАУЧНОЕ ЗНАНИЕ

43. а) Как научное знание приходит в физику? Обсудите роли, которые играют наблюдения, эксперимент и математика. Дайте примеры.

б) Может ли только одна математика дать новые знания о реальном мире? Если это так, укажите пример и критически проанализируйте его. Если нет, объясните, почему математика важна, если она может только воссоздать то, что мы уже узнали из эксперимента.

в) Посоветуйтесь с людьми, которые изучают биологию, геологию или физиологию, и установите, как в одной из этих наук получают знания. Сравните методы, используемые в этой науке, с методами в физике.

44. «Ньютоновская теория всемирного тяготения создала грандиозную умозрительную схему для солнечной системы и Земли». Что это за теория, каковы ее достижения, и почему она так грандиозна?

(При обсуждении достижений нужно не просто перечислить их, но и аргументировать их.) Однако вам не нужно тратить время на то, чтобы дать полные математические выкладки, за исключением, может быть, одного достижения, которое вы выберете.

45. «Кинетическая теория газов создает ложное чувство хорошей осведомленности о молекулах. Ее нельзя назвать хорошей теорией потому, что картина, которую она создает, это всего лишь некое построение на основе только отчасти верных предположений». Допустим, что вас попросили подготовить речь или написать длинное письмо, которое оспаривает или отвергает точку зрения, высказанную выше. Напишите план или короткую заметку, отражающие важные пункты вашей речи или письма (~ 1 страница).

46. а) Предположим, что вы сделали очень точные измерения плотности образца химически чистой меди, зная с очевидностью, что ваши экспериментальные ошибки составляют около 0,007% ваших результатов. Охотно ли вы опубликуете утверждение, касающееся плотности химически чистой меди?

б) Предположим, что вы измерили плотность мороженого из ближайшего ларька. Опубликуете ли вы утверждение, касающееся плотности мороженого, и поручитесь ли вы за него?

в) На основе ваших ответов на пункты а) и б) в качестве примеров прокомментируйте принцип однообразия природы (т. е. принцип, согласно которому объекты в природе ведут себя одинаково при одинаковых обстоятельствах). Обсудите вопрос, основан ли принцип на опыте или философском предположении.

«БРИТВА ОККАМА»

47. Посмотрите книги по философии (особенно по философии науки) или по истории науки и найдите, что означает «бритва Оккама».

а) Кратко расскажите об этом.

б) Найдите и сформулируйте ньютоновский вариант ее.

в) Пригодна ли она сегодня?

48. Почему мы не относимся к астрологии как к науке? (Напишите короткий реферат. Вас просят привести обоснованные аргументы с обсуждением определений без претензий на осуждение или неоправданные требования.)

Астрология — это система подробных традиционных правил, применяющихся к хорошей астрономической информации, она претендует на то, чтобы предсказывать или открывать будущее человека или его характер по расположению планет и звезд.

СУЕВЕРИЕ

49. Как вы думаете, что означает «суеверие»? Проанализируйте связь между суеверием и наукой в смысле материального удобства и интеллектуального благополучия.

50. а) Мы говорим, что можем вывести закон Бойля — Мариотта $PV = \text{const}$ из кинетической теории. Предположим, что выдающийся ученый вывел из другой теории (не кинетической) соотношение $P/V = \text{const}$. Этот результат

противоречит результатам экспериментальных исследований с газами. Предположим, однако, что в обоих случаях математические выводы оказываются абсолютно правильными. Поверите ли вы новой теории? Если так, то почему? Если нет, то что вы можете заподозрить?

б) Предположим, что вы познакомились с двумя теоретическими выводами закона Бойля — Мариотта. Оба совершенно разные; они делают разные предположения и основаны на совершенно разных идеях о том, что такое газ, но оба ведут к соотношению $PV=\text{const}$. Могли бы вы отдать предпочтение одной точке зрения и ее выводам перед другой? Если нет, то почему? Если да, почему и на каком основании?

в) Какие замечания, касающиеся справедливости теоретических доказательств, вы можете сделать?

51. Следующие пункты определяют некоторые характерные черты физической науки. Подыщите пример в одно предложение для каждой черты из изученного вами материала курса (~ 2 строчки для каждого).

а) Экспериментальное испытание предсказания.

б) Математический вывод из предположений.

в) Акцент на опыте, общем для большинства людей.

г) Получение закона из эксперимента.

д) Придумывание определения или введение термина, чтобы облегчить развитие какого-то направления в науке.

е) Изобретение величины, вычисляемой из результатов измерений, которая не зависит от формы и размеров образца.

ж) Измерение физической константы большим количеством приборов для того, чтобы показать, что закон, в который она входит, справедлив.

з) Подавление субъективного желания.

52. Какие заключения вы можете сделать из каждого следующего факта:

а) Жидкий воздух существует.

б) Некоторые «естественно» радиоактивные элементы излучают α-частицы, но ни один из них не испускает протоны или дейтроны.

в) Воздух комнатной температуры достаточно хорошо подчиняется закону Бойля — Мариотта в интервале давлений от нескольких атмосфер до малой доли атмосферы.

г) Ускорители электронов высокой энергии, в которых электроны пролетают вдоль тех же самых орбит много раз, работают должным образом, когда ускоряющие импульсы разделены равными временны́ми промежутками (после ранних стадий ускорения).

д) В эксперименте с «монетой и пером» перо падает столь же быстро, как монета, при любом низком давлении, таком, как 0,01 *ат*,— высокий вакуум не является необходимым для такой демонстрации, однако он необходим при измерении средней длины свободного пробега молекулы.

СОСТАВЛЕНИЕ ФОРМУЛЫ

53. Хорошие ученые часто используют формулы при оформлении результатов экспериментов. Они присваивают букву-символ каждой величине, которую измеряют, и находят правила, которым хотят придать алгебраическую форму; затем применяют алгебру, чтобы получить формулу для результата, который хотят вычислить, и потом используют арифметику. В этом пути имеется два преимущества перед прямым арифметическим путем:

1) он придает арифметике более компактную форму (некоторые множители могут быть сокращены), что экономит время и уменьшает опасность ошибки; 2) конечную формулу можно применять для обработки результатов большого количества разнообразных наборов измерений. Таким образом, формула не есть нечто хранящееся в справочниках или заученное наизусть и слепо применяющееся для решения задач, это составная часть пути ученого при выполнении его работы. Попытайтесь составить формулы в следующих примерах.

а) Специалист по баллистике стреляет ружейной пулей массы m килограмм с горизонтальной скоростью v *м/сек* в платформу массы M, стоящую на абсолютно гладком рельсовом пути. Специалист измеряет время t *сек*, необходимое для того, чтобы платформа при отдаче прошла путь S метров. Получите формулу, начинающуюся так: $v=\ldots$, которая выразит v через результаты измерений m, M, S, t.

б) Предположим, что в эксперименте Цартмана (гл. 25) барабан имеет диаметр d *м* и делает n оборотов в секунду. Молекулы со скоростью v *м/сек* делают отметку на записывающей пленке при прохождении y метров от начала отсчета. Выведите формулу для вычисления v из измерений.

в) Сила сопротивления трения, действующая на маленькую сферу, медленно движущуюся в воздухе, дается формулой $F=Krv$, где K — константа для воздуха, r и v — радиус и скорость сферы. Предположим, что маленькая капля жидкости плотности d падает с постоянной «конечной скоростью» v_t в воздухе. Измерение этой скорости может быть использовано для определения веса капли (см. эксперименты Милликена в гл. 36). Найдите формулу для вычисления массы капли m как функции измеренных величин d, v_t и K (которые должны быть измерены отдельно друг от друга).

г) В пункте в) r может быть дано в метрах, v — в *м/сек* и F — в ньютонах. Тогда K выразится в *н·сек/м*². Предположим, что вы продолжаете пользоваться этими единицами. Ваш ответ — формула для m — должен быть записан в единицах, которые приведут к килограммам. Поработайте над единицами в вашем ответе и найдите, так ли это.

д) Экспериментатор измеряет g, хронометрируя колебания маятника, состоящего из маленькой сферической гири, висящей на нити длиной X (от опоры до верхушки гири). При маленькой амплитуде n полное время колебания туда и обратно равно t секунд. Предполагая для периода справедливость выражения $T=2\pi\sqrt{L/g}$, найдите формулу вида $g=\ldots$ для вычисления g из его измерений n, t, d и т. д.

е) Если экспериментатор для своих измерений в пункте д) пользуется единицами МКС (метр, килограмм, секунда), будет ли его формула выражать g в подходящих единицах? Сделайте проверку единиц.

СЛОВАРЬ

(См. также задачи 1 и 5, предшествующие гл. 1, и задачи 12, 13, 16 в конце гл. 1.)

ТОЛКОВАНИЕ

54. Эпизод, напечатанный ниже, взят из Scientific American, May 1950 г., том 182, № 5, стр. 27—28. *Этот журнал публикует превосходные научно-популярные статьи, при этом он заботится о том, чтобы сделать их достоверными и правдивейшими.*

Предположим, что вы хотите объяснить коротко какие-то физические новости человеку, знающему физику гораздо хуже вас. Напишите короткую заметку о каждом подчеркнутом слове или фразе, объясняющую их значение настолько ясно, насколько это возможно. (Ваши заметки должны помочь вашему читателю понять, о чем идет речь, а также удивить его вашими познаниями.)

«Элемент 98»

Несколькими днями позже того, как Scientific American напечатал статью в апрельском выпуске, озаглавленную «Искусственные элементы», в которой сообщалось: «В данный момент список установленных элементов заканчивается 97-м», число элементов возросло до 98. О получении 98-го элемента, шестого искусственного добавления к периодической системе, было доложено в Калифорнийском университете.

Новый элемент был получен на 60-дюймовом циклотроне в Беркли при бомбардировке α-частицами с энергией 35 миллионов электронвольт нескольких миллионных долей грамма кюрия-242. 60-дюймовый циклотрон, в котором впервые получены и пять других искусственных элементов, был предпочтен в этой работе гигантскому 184-дюймовому по той причине, что последний дает α-частицы с энергией 400 *Мэв*, которые раскалывают ядра мишени вместо того, чтобы захватываться ими. 98-й элемент имеет период полураспада только 45 *мин*, и поэтому трудно было выделить то крошечное количество, которое получилось. Он был опознан только потому, что калифорнийские ученые смогли предсказать его период полураспада и химические свойства. Хотя элемент, пожалуй, никогда не будет получен в весовых количествах, его свойства имеют значительную теоретическую важность. Этот элемент — гомолог диспрозия, 66-го элемента, который входит в серию редкоземельных элементов, начинающуюся с лантана. Успешная идентификация 98-го элемента, основанная на предсказании, подтверждает теорию того, что искусственные элементы, располагающиеся за ураном, входят во вторую редкоземельную серию, чьим прототипом является элемент 89 — актиний. Если эта теория правильна, можно ожидать открытия еще пяти новых элементов, которые завершат серию.

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ

55. ЧЕЛОВЕЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Человек получает в день с пищей 3000 *ккал*. На поддержание его дыхания и прочее им расходуется 1500 *ккал* в день, а на прогулки в свободное время он тратит еще 1000 *ккал*. Его работа состоит в том, что он *носит тяжести вверх по лестнице*. Ежедневная работа, только восхождение наверх по лестнице и переноска тяжести, стоит ему 200 *ккал*, и еще 800 *ккал* он тратит в виде выделяющегося тепла.

а) Сколько нужно ему еще пищи, чтобы полностью скомпенсировать все расходы?

б) Ниже указано, что ему делать, чтобы выполнить работу. В каждом случае скажите, думаете ли вы, что это поможет ему (да или нет), и дайте краткое обоснование (~2 строчки) вашему ответу. ПРЕДПОЛОЖИТЕ, ЧТО В КАЖДЫЙ МОМЕНТ ЧЕЛОВЕК МОЖЕТ ВОСПОЛЬЗОВАТЬСЯ ТОЛЬКО ОДНИМ СОВЕТОМ,

1) Есть больше сладостей.
2) Твердо решить не сдаваться (не принимая других мер, которые перечислены здесь).
3) Использовать свои жировые запасы и, может быть, некоторые другие ткани своего тела.
4) Пить воду всякий раз, когда почувствуется усталость.
5) Держаться за перила лестницы, поднимаясь вверх, и подтягиваться на руках, чтобы помочь ногам.
6) Подниматься на эскалаторе, приводимом в действие электрическим мотором.
7) Оставаться внизу и использовать систему блоков, чтобы поднимать грузы, которые ему нужно нести наверх.
8) Спокойно стоять или лежать в постели в свободное время вместо прогулок.
9) Приспособить себе противовес, привязав к плечам канат и перекинув его через абсолютно гладкий блок, который находится на верху лестницы, к свободному концу каната привязать груз, немного меньший, чем его собственный вес (когда он не нагружен).

56. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ И КОМИССИЯ РАЗВИТИЯ

(Эта ситуация полностью надуманная, хотя некоторые ее задачи могут возникнуть реально, и тогда может быть использована одна из описанных здесь схем.)

Предположим, что

I) некая важная административная комиссия, которая рассматривает способы использования солнечной энергии, пригласила вас в качестве советника;

II) в силу некоторой серьезной необходимости желательно разработать такие схемы, которые были бы осуществимыми, даже если бы они были и не эффективными и требовали огромных сумм денег для исследований и разработок;

III) могут быть созданы технические устройства, использующие тепло воды и т. д., согретых солнечным светом;

IV) комиссия получила от большого числа людей предложения и объяснительные записки. Вас просят критически рассмотреть их и сделать замечания, используя ваши научные знания.

(Конечно, в реальной жизни ваше первое замечание может быть таким: «Могу ли я посмотреть записи экспериментов», или «Я должен сам сделать некоторые эксперименты», или «Я думаю проконсультироваться со специалистами в этой области». Однако при оценке предложений вы должны просто найти конкретную ошибку, или одобрить, или сообщить основную причину сомнения.)

Для простоты вы можете в дальнейшем предполагать, что те положения, которые *выделены курсивом*, правильны и не нуждаются в критике.

1) У каждого предложения поставьте значок, говорящий о том, как вы смотрите на предложение: как на хорошее, сомнительное или плохое. Пользуйтесь следующими значками:
   OK=вероятно, хорошее или заслуживающее проверки;
   ?=сомнительное;
   x=ложное, вводящее в заблуждение, вероятно, чепуха.
2) Дайте краткое обоснование (скажем, от 1 до 5 строк) вашему замечанию. (Ценность вашего ответа будет определяться его обоснованием.)

СХЕМА А. ОГРОМНЫЙ ПЛОСКИЙ РЕЗЕРВУАР С АЛЮМИНИЕВОЙ КРЫШКОЙ, УСТАНОВЛЕННЫЙ ПОД ОТКРЫТЫМ НЕБОМ И НАПОЛНЕННЫЙ ВОДОЙ, БУДЕТ СОБИРАТЬ ТЕПЛО, КОТОРОЕ МОЖЕТ БЫТЬ ИСПОЛЬЗОВАНО В ДАЛЬНЕЙШЕМ

Предложение А1. «Покрасьте крышку резервуара в черный цвет.»

Предложение А2. «Это правильно, что черная краска полезна, но та же масса краски поглотит столько же тепла, если она останется в банке. Вместо раскрашивания поставьте на крышку резервуара открытую банку с черной краской.»

Предложение А3. «Корпорация предлагает свою особую краску № 477В, которая в 10 раз лучше, чем черная, притягивает тепло к поверхности. Покрасьте ею поверхность.»

Предложение А4. «Замените воду в баке такой же массой твердого алюминия, и вы накопите в 5 раз больше тепла.» (*Алюминий имеет удельную теплоемкость 0,2, так что можно ожидать увеличения температуры в 5 раз по сравнению с водой.*)

Предложение А5. Алюминий выделяет тепло, если его поместить в серную кислоту, превращаясь в сульфатное соединение. Помажьте крышку равномерно кислотой.

Предложение А6. Некоторое количество тепла, собранное резервуаром, должно быть использовано для приведения в действие электрического генератора с тем, чтобы зарядить батареи, от которых будут питаться лампы, освещающие резервуар в облачные дни.

СХЕМА В. РАСТУЩИЕ ДЕРЕВЬЯ. «На месте резервуара вырастите на той же площади деревья, спилите их, высушите и сожгите. Это даст вам в 10 раз больше тепла».

СХЕМА С. СОЛНЕЧНЫЙ СВЕТ МОЖЕТ ОСВОБОЖДАТЬ ЭЛЕКТРОНЫ С ПОВЕРХНОСТИ НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ. ПУЧОК ЭЛЕКТРОНОВ С ТАКОЙ ПОВЕРХНОСТИ МОЖНО СОБРАТЬ И ИСПОЛЬЗОВАТЬ ДЛЯ ПРИВЕДЕНИЯ В ДЕЙСТВИЕ МЕХАНИЗМА, ОДНАКО ЭЛЕКТРОНЫ ИСПУСКАЮТСЯ С ОЧЕНЬ МАЛЫМИ СКОРОСТЯМИ.

Предложение С1. «*Пучок может быть собран и подведен к усилителю на триодах, который произведет больший пучок при более высоком напряжении.* Используйте это.»

Предложение C2. «Магниты, размещенные на поверхности, будут действовать на электроны и ускорять их.»

Предложение C3. Пропустите освобожденные электроны через *p* — *n*-переходы в полупроводнике. Соедините последовательно много таких *p*—*n*-переходов для увеличения напряжения и используйте эту батарею для приведения в действие электромотора.

СХЕМА D. МОЖНО ИСПОЛЬЗОВАТЬ ЗЕРКАЛА ДЛЯ ОТРАЖЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО СВЕТА НА КИПЯТИЛЬНИК, ГДЕ БУДЕТ ПОЛУЧАТЬСЯ ПАР.

Предложение D1. Окрасьте кипятильник в черный цвет.

Предложение D2. Покрасьте зеркало в черный цвет.

Предложение D3. Вместо воды налейте в кипятильник жидкость с большими молекулами. Когда жидкость закипит и получится пар, от трения между большими молекулами выделится огромное количество тепла.

СХЕМА E. Комиссии сделала предложение корпорация, которая приобрела у изобретателя секрет нагревания листа железа до красного каления солнечным светом.

Была устроена демонстрация на опытной модели, в ходе которой железный лист, помещенный на крыше демонстрационного ящика изобретателя, накалялся докрасна и вода в огромном жестяном ящике закипала.

Изобретатель объяснил, что модель в полную величину должна работать так же хорошо, ибо он получил математическую формулу, которая применима к любым размерам прибора. Он объяснил также, что в научных журналах пока нет еще даже и намека на его изобретение, что оно уже 20-летней давности и содержится в исключительном секрете, так что выдержало проверку временем. Комиссия убеждена в том, что изобретатель заслуживает доверия, так как его последняя книга по отдельным отраслям физики была раскуплена в огромных количествах и ей посвятили большие статьи (хотя до некоторой степени и враждебные) газеты, имеющие большую известность. Комиссия, на которую произвела впечатление эта схема, предложила одобрить приобретение секрета и строительство установки в полную величину. (Дайте, если хотите, более длинный комментарий.)

«ОЦЕНИВАНИЕ»

57. Сделайте очень грубую оценку в некоторых из следующих пунктов. Ваш метод оценивания интересен так же, как и сам результат, так что вы должны объяснить, как вы делаете оценки.

а) Какая часть общей территории Соединенных Штатов Америки занята дорогами всех видов? (Составляет ли эта часть 10%, которые должны делать жизнь едва возможной, или 0,0001%, которыми можно пренебречь, или где-то между этими двумя цифрами?)

б) Предполагая, что выливание масла на поверхность бурного моря дает успокаивающий эффект, оцените область, которая может быть успокоена 10 литрами подходящего масла.

в) Сколько аптек в Соединенных Штатах?

г) Какую, по вашему мнению, максимальную температуру имеет железный гвоздь при забивании его обыкновенным молотком?

Известно, что точильный камень «взрывается», когда вращается слишком быстро. Оцените скорость вращения, при которой он «взрывается».

д) Примем как вольное допущение, что у автомобильной шины, катящейся по гладкой дороге, стирается при каждом обороте слой резины толщиной в одну молекулу. Оцените размер молекулы. (Заметим, что резина состоит из огромных молекул, каждая из них изображается сложными молекулярными цепями, не похожими на молекулы масел.)

е) Оцените массу горы.

ж) Оцените энергию урагана. Сравните ее с энергией взрывов, производимых человеком.

ПОПУЛЯРНЫЕ СТАТЬИ И БОЛЬШИЕ РЕФЕРАТЫ

Научно-популярная статья потребует от вас научного чтения и записей размышлений над новыми для вас знаниями. Если после прочтения этой книги или изучения этого курса вы достигнете как знания фактов, так и понимания физической науки в целом, то вам может захотеться удостовериться в ваших приобретениях (перед самим собой или перед другими), показав, что вы можете читать и разъяснять другим дополнительную литературу в некоторой незнакомой вам области физики. Для этого вы должны выбрать какую-нибудь физическую тему, которая не изучалась в этой книге, но с которой все-таки вы могли соприкоснуться при работе над этим курсом, и связать с уже изученным материалом. Потратьте несколько недель на изучение вашей темы по книгам и научным журналам и затем напишите ваш собственный отчет по ней. Это даст вам возможность восполнить пробелы в курсе и, что более важно, благоприятную возможность показать, насколько хорошо вы можете теперь изучать науку дальше при самостоятельном чтении. Таким образом, «чтение статей» является проверкой усвоения курса.

Ниже предложены некоторые темы. Списки предлагаемых книг не даны, потому что выбор зависит от библиотечного обслуживания и может измениться, когда появятся новые книги. Кроме того, есть большая польза в самостоятельных поисках книг, в наведении справок по научным статьям и сравнении содержания одной книги с содержанием других. В этом состоит отличие доклада по одной книге от обзора, который дает ощущение основательных знаний. При написании вашей статьи вы должны помнить о читателе, для которого она предназначается. Вашим заданным читателем может быть ваш однокурсник, который выбрал другую тему для своей статьи, но хочет изучить вашу, читая вашу статью. Или он может быть студентом, который прослушал курс лекций по физике где-нибудь в другом месте, освоил фактический материал и хочет ознакомиться с вашей трактовкой. Или вы можете выбрать профессионального учителя физики, который намеревается прочитать вашу статью и оценить ее, но этот выбор, вероятно, будет менее выгодным для вас. Даже когда вы выберете себе тему, у вас останется еще широкий выбор между детальным рассмотрением узкой ее части или поверхностным охватом в целом. Это дело вкуса. Вдумчивый читатель примет ваш выбор широты охвата и будет ожидать соответствующего уровня глубины рассмотрения. Основой его оценки будет ощущение того, подаете ли вы материал, разобравшись в нем, и сделали ли вы его настолько своим собственным, что можете толковать другим. Вам предлагается не просто представить собранную информацию, а изложить основательные знания и результаты тщательного обдумывания. Итак, качество, а не длина вашего обзора будет главным критерием.

I. История радиоактивности

(1890—1915 гг. или с 1915 г. до настоящего времени).

По данному вопросу написаны хорошие книги. Их изучение — интересное занятие, и на эту тему вы можете написать сочинение любой степени трудности. Трудно написать плохую статью на эту тему, потому что как только вы начнете читать, то увидите широкие возможности. И относительно короткая статья легко может начать разрастаться, все шире и шире охватывая тему. Так что эта тема — хороший выбор, если вы не знаете, на чем остановиться.

II. Эксперимент Милликена для определения *e*

Милликен написал великолепный отчет о своей работе. Сначала обратитесь к его книге. Этого может оказаться достаточным.

III. Камеры Вильсона: принцип действия, снимки, расшифровка снимков

Устройство и действие прибора описать легко. Основная работа при написании этой статьи должна состоять из подборки интересной информации, из выяснения того, какие сведения об атомных и ядерных превращениях можно получать из нее, и наконец из описания результатов исследований. Эта статья легко может превратиться в разочарующе беглый перечень фактов, но, если отнестись к ней внимательно и сделать ударение на выводах, она может получиться очень хорошей.

IV. Треки частиц в фотоэмульсиях или в пузырьковых камерах

Последние — преемники камер Вильсона. С их помощью получено большое количество новой информации о ядрах. В статье требуется дать более подробное описание приборов и методик измерений, но, как и в предыдущем пункте, успех статьи будет зависеть в большой степени от хорошего описания результатов и объяснения выводов.

V. Открытие и свойства рентгеновских лучей

Рентгеновские лучи имеют романтическую историю — есть хорошие описания открытия Рентгена — и нашли очень важное применение в медицине и атомной физике. В этой статье значительное внимание должно быть уделено использованию рентгеновских лучей в физике, например при классифицировании кристаллических структур. Работа над статьей будет легче и плодотворней, если вы уже изучили оптику.

VI. Космические лучи

Частицы высоких энергий, летящие из отдаленных областей космоса, приходят к нам как сложная смесь электронов, ядер, μ-мезонов и т. д. Они могут вызывать сильные изменения в атомах, и экспериментатор может пользоваться этим в своих целях, хотя таких частиц довольно мало. Для этого применяют камеры Вильсона, ионизационные камеры, счетчики. Помещая их в аэростатах, шахтах, на кораблях, можно изучать или использовать влияние

атмосферы и магнитного поля Земли. Чтение при изучении предлагаемой темы чрезвычайно трудное, однако это очень богатая область. Было бы разумным выбрать для статьи часть этой области. Великолепный выбор — если у вас смелый и любознательный ум.

VII. Физика частиц высоких энергий

Космические лучи и самые большие ускорители дают возможность исследовать электроны, ядра, μ-мезоны с очень высокой энергией (и скоростью почти c). Статья об экспериментах, результатах и их интерпретациях должна быть трудной, но вознаграждающей за все трудности.

VIII. Масс-спектрографы: устройство, принцип действия, результаты

Подробности простого устройства даны в гл. 38; современные действующие конструкции намного более сложны и остроумны. Это техническая тема, но у вас есть необходимые основы для ее изучения и несколько хороших описаний современных конструкций.

IX. Ускорители: устройство и принцип работы

В настоящее время существует много типов ускорителей, отличающихся от ускорителя Ван-де-Граафа и циклотрона, описанных в тексте. Изучение современных ускорителей требует глубокого понимания электромагнетизма. Это, должно быть, трудная, но интересная работа. Примеры: линейный ускоритель, «бетатрон», ускоритель «космотрон».

X. Свойства атомных частиц

Все еще открывают новые разновидности частиц: α-, β-частицы, электроны, позитроны, нейтроны, нейтрино, мезоны и т. д. Список продолжают еще более странные частицы. Эта тема в общем перекликается с пунктом I, но она продолжена до рубежа современных исследований. Выберите и опишите несколько частиц или дайте обзор всех. Как эти частицы получаются, выделяются и исследуются? Что мы таким образом узнаем об атомах?

XI. Свойства электронов: открытие, измерение заряда и другие свойства, волновые свойства, фотоэффект

Эта тема значительно выходит за рамки курса. При широком охвате материала она окажется трудной, но интересной.

XII. Волны: поведение частиц

Великая революция в физике произошла четверть века тому назад на основе открытия, что как фотоны, так и частицы имеют двойственную природу: они ведут себя как частицы и имеют в то же время волновые свойства. Изучите экспериментальные доказательства этого. Если вы в ладах с математикой, выясните, как новые идеи повлияли на теоретическую физику.

XIII. Эксперименты, показывающие, что «классическая физика ложна»

Обзор экспериментов, которые привели к развитию квантовой теории, а именно эксперименты по определению удельной теплоемкости, излучение

черного тела, фотоэффект, открытие волновых свойств материи и т. д.— трудная тема, требующая упорного изучения, но вы будете вознаграждены за упорство. Вероятно, было бы лучше всего ограничиться двумя из упомянутых экспериментов и изучить их досконально.

XIV. Очень низкие температуры: получение и эксперименты, в которых они используются

Это область температур ниже температуры обычных охлаждающих смесей или сухого льда. Она начинается от температуры «жидкого воздуха» и доходит почти до абсолютного нуля. Имеется большое разнообразие методов и аппаратуры для получения жидкого воздуха, жидкого водорода, жидкого гелия, и, наконец, хитроумные размагничивающие схемы позволяют получить (и измерить) еще более низкие температуры вблизи абсолютного нуля. При очень низких температурах большинство веществ становятся твердыми и хрупкими, но существуют и другие неожиданные эффекты, которые делают исследования очень увлекательным занятием.

Трудная тема!

XV. Физика звезд

Как были измерены массы, температуры, размеры и т. д. звезд и исследована звездная эволюция? Очень интересная тема и почти неограниченное поле деятельности. В некоторых учебниках даны короткие описательные объяснения «астрофизики», но вам нужно прочитать намного больше, чтобы понять, как наши знания о звездах получаются из наблюдений, как результаты наблюдений интерпретируются теорией.

XVI. Спектроскопия в астрономии

Расположения, скорости, температуры и т. д. планет, звезд, туманностей были исследованы при помещении спектроскопа в телескоп. Звездная спектроскопия расширила также наши знания об атомных спектрах в таких состояниях возбуждения и ионизации, которые не доступны исследователям в обычных земных условиях. Таким образом, мы можем сказать, что такой спектроскоп является астрономическим инструментом нашей эпохи. Эта статья требует описаний некоторых методов использования спектроскопов, затем обсуждения физической интерпретации результатов.

Романтическая, современная, астрономическая тема, но весьма трудная.

XVII. Возраст Земли: физические оценки

Эта тема не требует геологических знаний или рассуждений. Физические методы широко использовались для определения возраста Земли — одним из современных методов является радиоактивный метод. Чтобы обосновать эту тему как физический очерк, вам нужно изложить физические методы и показать, как их результаты и интерпретация связаны с геологическими данными.

XVIII. Биография: жизнь и творчество в физике одного из ученых, перечисленных ниже

а) Эрнест Резерфорд, б) Дж. Дж. Томсон, в) П. Н. Лебедев. Так как это описание человека и его работы, то оно должно содержать по крайней

мере короткую биографию. Поскольку эта тема имеет в виду изучение важных этапов развития физики, статья должна дать полный и ясный отчет о деятельности человека в физике — его физические открытия должны быть как описаны, так и объяснены. Легко недооценить серьезные возможности этой темы или недооценить количество ожидаемого физического материала. При серьезном отношении изучение творчества одного из ученых могло бы стать очень интересным делом.

XIX. Механика Ньютона и философия

Как ньютоновская физика связана с философскими взглядами его современников? Как его деятельность повлияла на философию последующих поколений? Такая статья должна быть интересна как физику, так и философу. Чтобы написать ее, вы должны быть большим любителем философии, но вам не нужно быть философом-специалистом.

XX. Философия физической науки с точки зрения любителя

Если вы уже изучали философию науки по установленной программе, то вы увидите, что работа над таким очерком не очень благодарна; она покажется больше похожей на курсовой реферат, чем на изложение новых размышлений при чтении нового. Но если вы любитель без соответствующей подготовки, но относитесь с интересом к философии, вы сможете получить удовольствие, читая и описывая этот предмет, и вы должны надеяться на то, что читатели будут симпатизировать любительской точке зрения. Просмотрите книги, перечисленные ниже, и те, которые вы сможете найти по философии науки. Вы должны положить в основу своего реферата по крайней мере две из этих книг: «Философия науки» Стефана Толмина, «Эксперимент и теория в физике» Макса Борна, «Метафизические основы современной физической науки» И. А. Барта.

«Philosophy of Science» by Stephen Toulmin
«Experiment and Theory in Physics» by Max Born
«The Metaphisical Foundations of Modern Physics Science», by E. A. Burtt.

XXI. Физика звука и музыка

Существует много хороших книг, описывающих и объясняющих физику звука. При написании статьи вы должны показать, что тщательно разобрались в физике, а не просто описываете результаты или сформулированные правила. Ваша статья должна дать и удовольствие, и полезные знания музыканту, который прочтет ее.

XXII. Если вы выбрали свою собственную тему, то очень важно выполнить следующие условия:

а) Она должна быть достаточно богатой физическим материалом, так что, когда вы напишете вашу статью, вы сможете рассматривать ее как солидный научный труд.

б) Она должна быть темой, по которой есть несколько имеющихся в распоряжении (доступных) современных книг.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

ЧАСТЬ ПЯТАЯ. АТОМЫ И ЯДРА

Физика для любознательных

